

JAERI-Tech
2001-072

JP0150890



逆動特性法を用いた大きな負の反応度測定法の開発

2001年11月

高橋 広幸・竹内 光男・村山 洋二

日本原子力研究所
Japan Atomic Energy Research Institute

本レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。
入手の問合せは、日本原子力研究所研究情報部研究情報課（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村）あて、お申し越しください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

This report is issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Research Information Division, Department of Intellectual Resources, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 2001

編集兼発行 日本原子力研究所

逆動特性法を用いた大きな負の反応度測定法の開発

日本原子力研究所東海研究所研究炉部
高橋 広幸・竹内 光男・村山 洋二

(2001年10月1日受理)

従来、大きな負の反応度の測定には、制御棒反応度値の測定結果から求める中性子吸収置換法が用いられている。しかし、この方法では、制御棒反応度値の測定に時間がかかるてしまう。

JRR-3Mにおいては測定時間の短縮、測定精度の向上を図るため、所定の原子炉出力の臨界状態から深い未臨界状態までの炉内平均中性子数の時間変化を測定することにより反応度を算出する逆動特性法を用いて測定を行っている。中性子数の測定は、遅れ応答のないパルス信号または電流信号に変換する中性子検出器を用いて行う。電流信号出力の中性子検出器を用いる計測系の場合は、中性子数変化が3桁以上と広範囲な計測が必要となるため、信号の増幅に対数増幅器を用いることから対数増幅器の遅れ応答特性が測定結果に影響を及ぼすこととなる。

そこで、逆動特性法(IKRD法)を用いた測定手法の対数増幅器の遅れ応答特性による影響の修正法を新たに開発し、JRR-3Mシリサイド燃料初装荷炉心の特性試験時の計測記録を用いて測定手法の妥当性及び測定精度向上の確認を行った。その結果、本測定手法は、精度良く測定できることが明らかになり、手法として確立したので本報にて報告する。

Development of Measurement Technique of Large Negative Reactivity
by an Inverse Kinetics Rod Drop Method

Hiroyuki TAKAHASHI , Mitsuo TAKEUCHI and Yoji MURAYAMA

Department of Research Reactor
Tokai Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Tokai-mura,Naka-gun,Ibaraki-ken

(Received October1 ,2001)

The determination of the large negative reactivity by a rod drop method is conducted by the change of the average neutron density in the core between the critical condition at constant power and the deep subcritical condition.

The neutron density is measured with a neutron detector which output the pulse or electric current signal without time delay.

If an electric-current-output neutron detector is used for the measurement, a logarithmic amplifier is required to measure over a wide range of neutron density of more than 3 digits and the time delay characteristic of the amplifier may badly influence the measurement results. The authors developed a measurement technique with an inverse kinetics rod drop (IKRD) method compensating the time delay characteristic of a logarithmic amplifiers, and confirmed the validity and high precision of the technique by applying it to the measurement data obtained in the characteristic experiments of the JRR-3M silicide core.

Keywords : Large Negative Reactivity, IKRD Method, Logarithmic Amplifies, JRR-3M

目 次

1. 緒言 -----	1
2. 測定方法 -----	2
2.1 測定原理 -----	2
2.2 対数増幅器の遅れ応答の修正 -----	4
3. 事前検討 -----	8
3.1 実データによる検証と検討 -----	8
3.2 模擬信号による確認 -----	8
4. 測定結果 -----	16
4.1 試験条件 -----	16
4.2 結果 -----	17
5. 解析 -----	49
5.1 解析コード -----	49
5.2 解析モデル -----	49
5.3 解析結果 -----	49
6. 評価 -----	55
7. 結言 -----	55
謝辞 -----	58
参考文献 -----	58

Contents

1. Introduction -----	1
2. Measuring Method -----	2
2.1 Measurement Principle -----	2
2.2 Correction of The Time Delay Characteristic of a Logarithmic Amplifies -----	4
3. Preliminary Examination -----	8
3.1 Verification and Examination by Real Data -----	8
3.2 Confirmation by Trial Signal -----	8
4. Measurement Result -----	16
4.1 Testing Condition -----	16
4.2 Results -----	17
5. Analysis Result -----	49
5.1 Calculation Code -----	49
5.2 Calculation Model -----	49
5.3 Calculation Results -----	49
6. Evaluation -----	55
7. Conclusion -----	55
Acknowledgement -----	58
References -----	58

1. 緒 言

従来、大きな負の反応度の測定には、制御棒反応度価値の測定結果から求める中性子吸收置換法が用いられている。しかし、この方法では、制御棒反応度価値の測定に時間がかかるてしまう。

JRR-3Mにおいては測定時間の短縮、測定精度の向上を図るため、所定の原子炉出力の臨界状態から深い未臨界状態までの炉内平均中性子数の時間変化を測定することにより反応度を算出する逆動特性法⁽¹⁾ (Inverse Kinetics Rod Drop Method 以下 IKRD 法⁽²⁾と略す。) を用いて測定を行っている。

本報では、臨界状態の全制御棒を炉心内に全挿入したときの原子炉停止状態の負の反応度を原子炉停止余裕（ワンロッドスタッフ等制御棒の炉心未挿入は想定しない。）とする。

中性子数の測定は、遅れ応答のないパルス信号または電流信号に変換する中性子検出器を用いて行う。中性子検出器は、3 デカード以上の広範囲な中性子検出特性及び炉内平均中性子数が測定できる中性子検出器の設置位置について、炉心部の構造、核的特性等の特徴に合わせた仕様にて選択している。

深い未臨界状態の中性子数の測定は、核分裂により発生する中性子以外の γ -n 反応⁽³⁾による光中性子等の影響が無視できなくなり、これが、測定精度に影響を与えることになる。また、電流出力の中性子検出器を用いる場合は、中性子数変化が 3 衍以上と広範囲な計測が必要となるため、信号の増幅に対する対数増幅器を用いることから対数増幅器の遅れ応答特性が測定結果に影響を及ぼすこととなる。

そこで、原子炉停止余裕の測定においては、逆動特性法(IKRD 法)を用いた測定手法の対数増幅器の遅れ応答特性による影響の修正法を新たに開発し、対数増幅器の遅れ応答特性の修正及び中性子源の影響を考慮した IKRD 法の測定精度の向上を図った。

以下に、新たに開発した測定手法を付加する IKRD 法の測定方法、模擬信号による測定手法の事前検討、JRR-3M(Japan Research Reactor No.3 Modified)シリサイド燃料初装荷炉心での測定結果、モンテカルロ中性子輸送計算コード MVP/GMVP⁽⁴⁾による解析結果等について記す。

2. 測定方法

2. 1 測定原理

(1) IKRD 法の原理

原子炉出力は、核分裂連鎖反応を制御棒等により制御することで調整される。核分裂連鎖反応の成立は、中性子増倍率 $k(t)$ で表される。中性子増倍率 $k(t)$ は、反応度 $\rho(t) = (k(t) - 1)/k(t)$ の関係にある。中性子数 n と反応度 $\rho(t)$ の関係は、一群拡散モデルを空間依存のない単純化したモデルから得られる 1 点炉動特性方程式で表される。

$$\frac{dn}{dt} = \frac{\rho(t) - \beta}{\Lambda} n(t) + \sum \lambda_i C_i(t) + S \quad (2.1)$$

$$\frac{dC_i}{dt} = \frac{\beta_i}{\Lambda} n(t) - \lambda_i C_i(t) \quad (2.2)$$

n : 中性子数

ρ : 反応度

Λ : 平均中性子世代時間

β : 実効遅発中性子割合

C_i : i 群の遅発中性子先行核数

λ_i : i 群の遅発中性子先行核崩壊定数

β_i : i 群の遅発中性子割合

S : 中性子源強度

(2.1)式、(2.2)式を変形、積分することにより、反応度を求める次式（逆動特性方程式）を得る。

$$\rho(t) = \beta + \frac{\Lambda}{n(t)} \frac{dn}{dt} - \frac{\Lambda}{n(t)} \sum \lambda_i C_i(t) - \frac{S\Lambda}{n(t)} \quad (2.3)$$

$$C_i(t) = C_{i(0)} e^{-\lambda_i t} + \frac{\beta_i}{\Lambda} \int_0^t n(\tau) e^{\lambda_i(t-\tau)} d\tau \quad (2.4)$$

$$C_{i(0)} = \frac{1}{\lambda_i} \frac{\beta_i}{\Lambda} n_0 \quad (2.5)$$

時刻 t_j の時の n の値を n_j 、サンプリング周期 Δt を $(t_j - t_{j-1})$ とすると

$$\mu_j = \frac{dn/dt}{n(t)} = \frac{\ln(n_j/n_{j-1})}{\Delta t} \quad (2.6)$$

$$\begin{aligned} A_{i,j} &= \int_0^{t_j} n(\tau) e^{-\lambda_i(t_j-\tau)} d\tau \\ &= A_{i,j} e^{-\lambda_i \Delta t} + \frac{1}{\mu_j + \lambda_i} (n_j - n_{j-1} e^{\lambda_i \Delta t}) \end{aligned} \quad (2.7)$$

として反応度 ρ_j は、次式で求められる。

$$\rho_j = \beta + \Lambda \mu_j - \frac{1}{n_j} \sum \beta_i (n_0 e^{-\lambda_i t} + \lambda_i A_{i,j}) - \frac{S \Lambda}{n_j} \quad (2.8)$$

また、中性子源強度 S を考慮しない反応度 ρ_j' は、次式で表す。

$$\rho_j' = \beta + \Lambda \mu_j - \frac{1}{n_j} \sum \beta_i (n_0 e^{-\lambda_i t} + \lambda_i A_{i,j}) \quad (2.9)$$

従って、中性子源強度 S を考慮した真の反応度 $\rho(t)$ は、次式で表す。

$$\rho(t) = \rho'(t) - \frac{S \Lambda}{n(t)} \quad (2.10)$$

即ち、臨界状態を初期条件として中性子数 n の時間変化を測定することにより、投入反応度 $\rho(t)$ (真の反応度) を得る。

(2) 定常的な中性子源が存在する場合の反応度測定

中性子源の影響が無視できる高い原子炉出力 ((2.10)式で $S \Lambda \ll n(t)$ の関係の場合) で行う制御棒反応度価値測定等は、(2.9)式の反応度 $\rho'(t)$ の実時間測定により行うことができる。しかし、原子炉出力が低く中性子源強度 S が計測される中性子数 n(t) に影響する場合は、真の反応度 $\rho(t)$ に影響を与えて測定結果の誤差が増加することになり、測定精度に影響することが(2.10)より明らかである。そこで、中性子源の影響を受ける場合の反応度測定は、次項 (3) の手法により中性子源強度 S を求め、(2.10) 式を用いた反応度 $\rho(t)$ の測定により、高精度で中性子源の影響を修正する手法を開発した⁽⁵⁾。

(3) 中性子源強度の同定

中性子源強度 S は、制御棒の炉心急速挿入後の、未臨界の平衡状態を示すまでの計測データの統計処理⁽⁶⁾により同定する。未知数である投入反応度 $\rho(t)$ と中性子源強度 S を一定として、既知である(2.9)式の反応度 $\rho'(t)$ の時系列データを観測値である中性子数 n(t) の時系列データを用いた(2.10)式を単回帰モデル⁽⁶⁾ ($Y = aX + b$) により次に示す統計処理を行う。 $S = a$ 、 $\rho(t) = b$ 、 $\Lambda/n(t) = X$ 、 $\rho'(t) = Y$ 及び指定の処理時間範囲を T とするデータ変換を行う。

中性子源強度 S は、

$$a = \frac{T \cdot \sum X \cdot Y - \sum X \cdot \sum Y}{T \cdot \sum X \cdot X - \sum X \cdot \sum X} \quad (2.11)$$

真の反応度 ρ は、

$$b = \frac{\sum Y - a \cdot \sum X}{T} \quad (2.12)$$

である。

従って、既知である X、Y から回帰係数 a、b を求め中性子源強度 S を算出するものである。

2. 2 対数増幅器の遅れ応答の修正

制御棒落下法による大きな負の反応度の測定は、所定の出力の臨界状態から深い未臨界状態までの炉内平均中性子数の時間変化を測定することにより算出する方法である。中性子数の測定は、遅れ応答のないパルス信号または電流信号に変換する中性子検出器を用いて行う。電流信号出力の中性子検出器を用いる計測系の場合は、中性子数変化が3桁以上と広範囲な計測が必要となるため、信号の増幅に対数増幅器を用いることから対数増幅器の遅れ応答特性が測定結果に影響を及ぼすこととなる。

そこで、JRR-3Mで反応度測定に使用している対数増幅器の応答遅れ特性を調べ、その特性に基づいた補正フィルタ⁽⁷⁾を設計し、対数増幅器の遅れ応答の補正手法を開発した。

(1) 対数増幅器の特性

対数増幅器の各レベルからのステップ応答信号特性より、当増幅器が一次遅れであると仮定して、各出力信号レベルにおける遅れ時定数を求めた。ステップ応答特性よりその時定数を推定する方法について、第2.1図を用いて記述する。なお、測定値は対数出力の信号であるため、ここでは線形値に変換した値を用いている。ステップ信号入力前の平均値を E_0 とし、ステップ信号入力後の最終安定値を E_a とする。ステップ信号入力後の値とその時刻をそれぞれ、 $e_1, e_2, e_3, e_4, \dots, t_1, t_2, t_3, t_4, \dots$ とする。ステップ信号が入力される時刻は、必ずしもサンプリングの時点と一致しないため、ステップ信号入力後の値を用いて、以下の式に回帰分析により近似して時定数を求めた。

$$E(t) = E_0 - (E_0 - E_a) \{ 1 - \exp(-(t_0 + t)/\tau) \} \quad (2.13)$$

ここで、 t_0 はステップ信号が入力された時刻、 τ は時定数で、これらを未知数として算出した。その結果を第2.1表に示す。

ステップ応答測定データは、サンプリング間隔 0.1 秒で採取されており、ケース 1, 2 における時定数は、それぞれ 0.0003 秒、0.003 秒のオーダーであり、時定数の評価は困難である。また、ケース 3、ケース 6-1 においても同様な理由により時定数の評価結果は誤差が大きい結果となった。以上の信号レベル（初期値（線形））に対する時定数のグラフを、第2.2図に示す。

誤差の大きいケース 3、ケース 6-1 を除いた点について、 $\tau = a/E$ で関数近似を行うと、式(2.14)の結果となる。

$$\tau = 35.47/E \quad (\text{s}) \quad (2.14)$$

(2) 一次遅れの補正フィルタ

一次遅れ系の時定数を τ とするとき、入力 x に対する出力 y は、離散系の場合でサンプリング間隔を dt として、式(2.15)で表せる。

$$y_i = y_{i-1} \cdot (1 - \alpha) + x_i \cdot \alpha \quad (2.15)$$

ここで、 $\alpha = 1 - \exp(-dt/\tau)$

式(2.15)を x について解くと、式(2.16)が得られ、この計算式が、一次遅れ補正フィルタである。

$$x_i = y_i / \alpha - y_{i-1} \cdot (1 - \alpha) / \alpha \quad (2.16)$$

このフィルタを対数増幅器の出力信号に適用する場合は、式(2.16)の α を

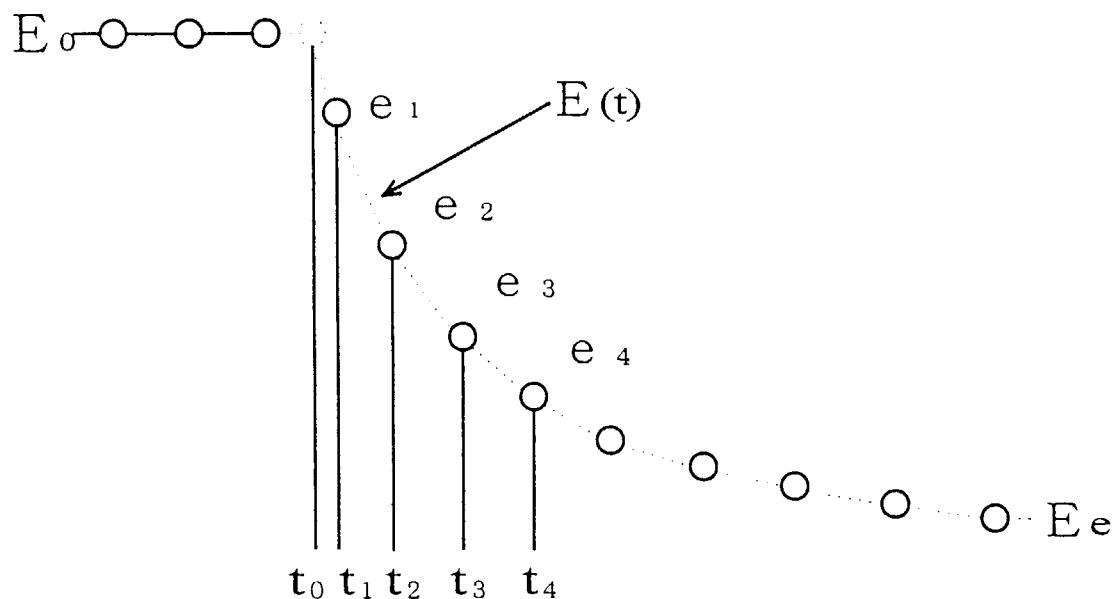
$$\alpha = 1 - \exp\{-dt/(35.47/y_i)\} \quad (2.17)$$

として、逐次 α を更新すればよい。

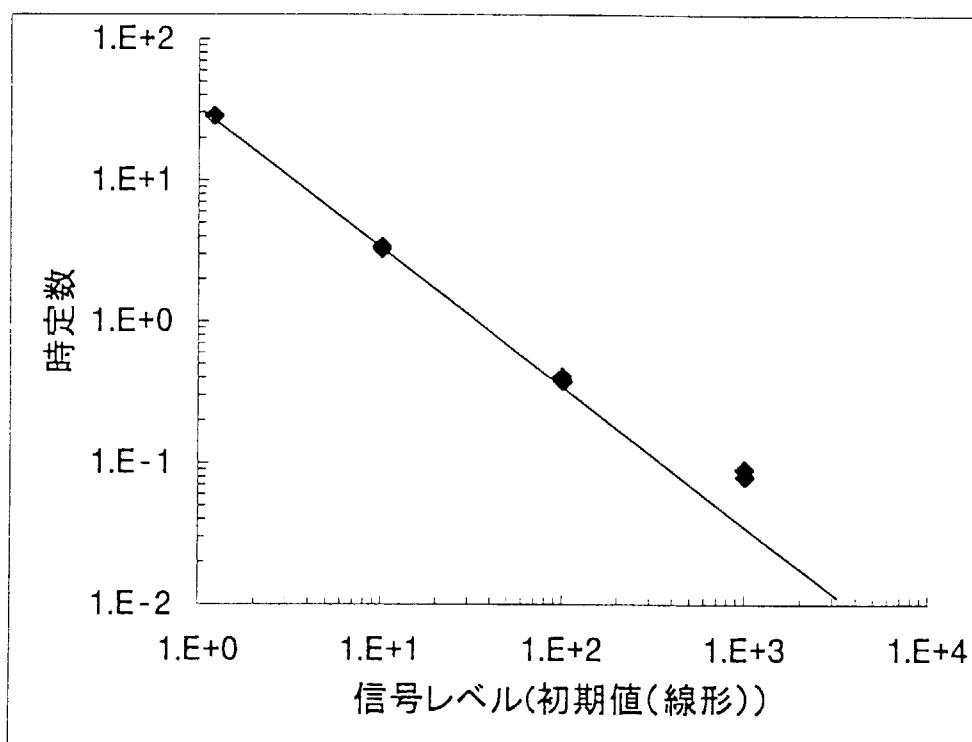
原子炉停止余裕等の大きな負の反応度を測定する場合、計測した中性子信号に対数増幅器の遅れ応答の影響が含まれている場合は、補正フィルタ (2.16) 式により中性子信号を再評価し、(2.10) 式により原子炉停止余裕を算出すればよいことになる。

第2. 1表 対数増幅器の時定数評価結果

ケース	試験番号	初期値 (対数)	初期値 (線形)	最終値 (対数)	最終値 (線形)	時定数
1	R3STEP_05	5.000	100007	-0.2357	0.4811	---
2	R3STEP_04	4.001	10019.7	-0.2383	0.5774	---
3	R3STEP_03	2.999	997.3	-0.2395	0.5761	0.08
4	R3STEP_02	1.998	99.64	-0.2399	0.5755	0.375
5	R3STEP_01	0.999	9.966	-0.2405	0.5748	3.26
6 - 1	R3STEP_06	2.994	986.49	1.9926	98.319	0.09
6 - 2	R3STEP_06	1.993	98.32	0.9984	9.9629	0.404
6 - 3	R3STEP_06	0.998	9.963	0.02939	1.0700	3.37
7	R3STEP_07	0.078	1.197	-0.4397	0.3634	28.57



第2.1図 ステップ応答時の関数近似



第2.2図 信号レベルに対する時定数

3. 事前検討

3. 1 実データによる検証と検討

実際の測定に使用する前に、開発した測定手法が対数増幅器の応答遅れ補正の機能を果たしていることを確認するために、実データを用いて評価を行った。

ステップ応答試験の内、1デコードづつ段階的にステップ信号を入力した場合のデータについて、一次遅れ補正処理をした結果を第3.1図に示す。第3.1図には、試験初期の高いレベルからのステップ応答はほとんど遅れがないため、 $1 \times 10^{-8}(\text{A})$ からの応答以降の結果を図示し、補正前の応答と補正後の応答を重ねてプロットしている。補正後の応答は、入力信号レベルが低くなると高周波ノイズが強調されているが、遅れが修正されていることが確認できる。また、ステップ信号入力直後にダウンシートがみられるが、これはサンプリング間隔がステップ応答の変化に対して、大きすぎることによるものと考えられる。

測定結果の確度の向上を図るため、ダウンシートについては、スクラム試験のような単調減少信号の測定に限られることから、その後の平均値を用いて抑制し、ノイズのゆらぎは、一次式によりスムージング処理⁽⁸⁾を行った。その結果を第3.2図に示す。この結果、本手法により対数増幅器の応答遅れが改善されていることがわかる。

3. 2 模擬信号による確認

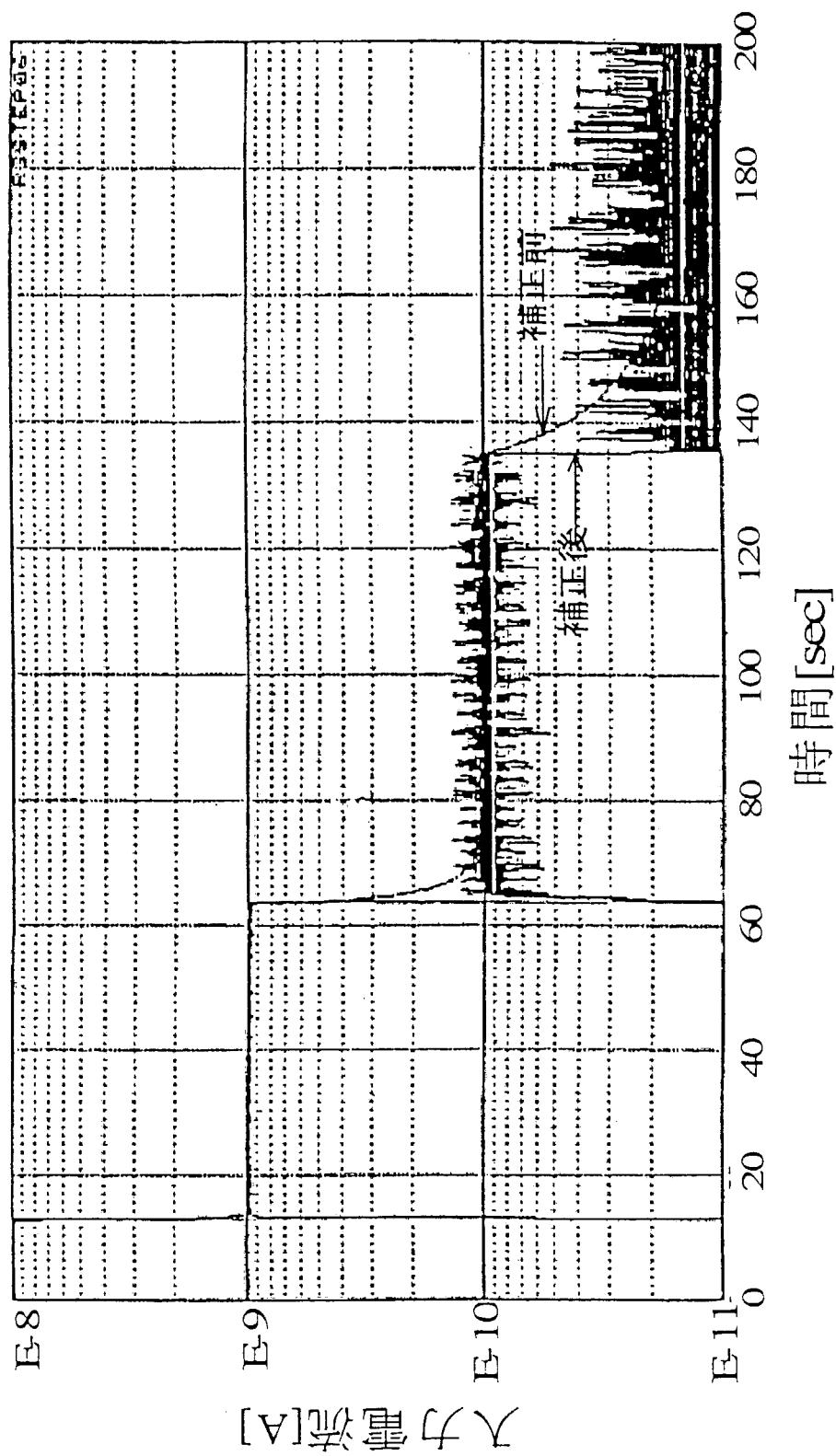
スクラム時の対数増幅器出力の信号変化を模擬した模擬信号を作成し回路遅れ補正及び中性子源強度補正の組み合わせの測定手法評価を行った。

模擬信号は、初期出力 10kW 、中性子源強度 2kW/s 、投入反応度- $15.05\% \Delta k/k$ の条件で、信号の遅れ時間 $31.2\text{s}/E(1E=1\text{W})$ 、時間間隔 0.1 秒の 600 秒間の信号データを作成した。この模擬信号を使用して、回路遅れ補正、中性子源強度補正の各補正の有無をパラメータとして、反応度と中性子源強度を求めた。その結果を第3.1表及び第3.3図、第3.4図、第3.5図、第3.6図に示す。

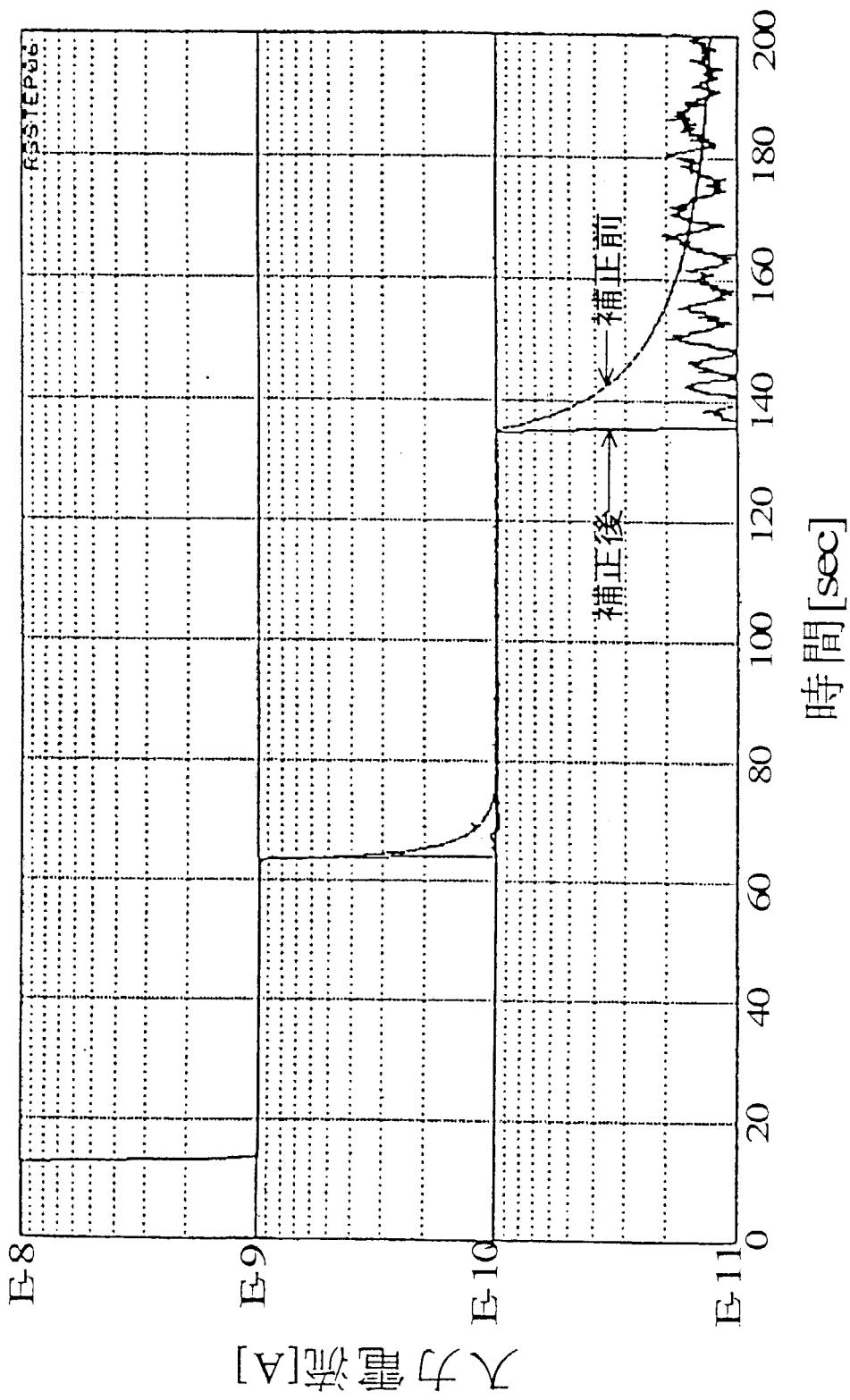
2章に示した測定手法を用いて回路遅れ補正及び中性子源強度補正を行った結果、反応度計算結果- $15.06\% \Delta k/k$ 、中性子源強度 1.999kW/s となり、模擬信号条件の投入反応度- $15.05\% \Delta k/k$ 、中性子源強度 2kW/s と良く一致する値となった。この結果、回路遅れ補正及び中性子源強度補正の手法の有効性が確認できた。

第3.1表 模擬信号における反応度、中性子源強度評価結果

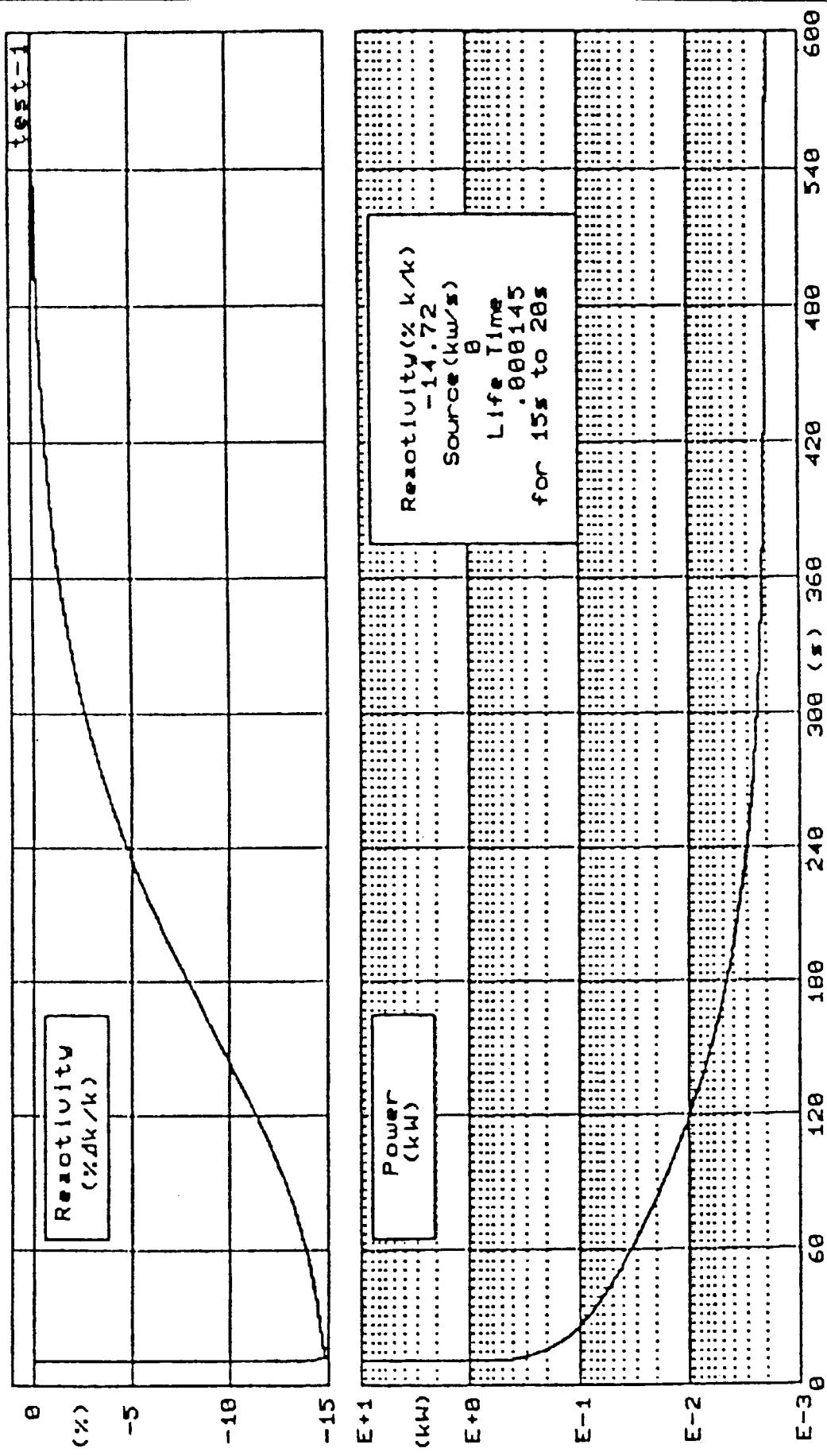
		評価条件	
遅れ補正	なし	あり	なし
中性子源補正	なし	なし	あり
評価結果			
反応度計算結果 (% $\Delta k/k$)	-14.72	-14.90	-14.30
中性子源強度 (kW/s)	—	—	1.940
			1.999



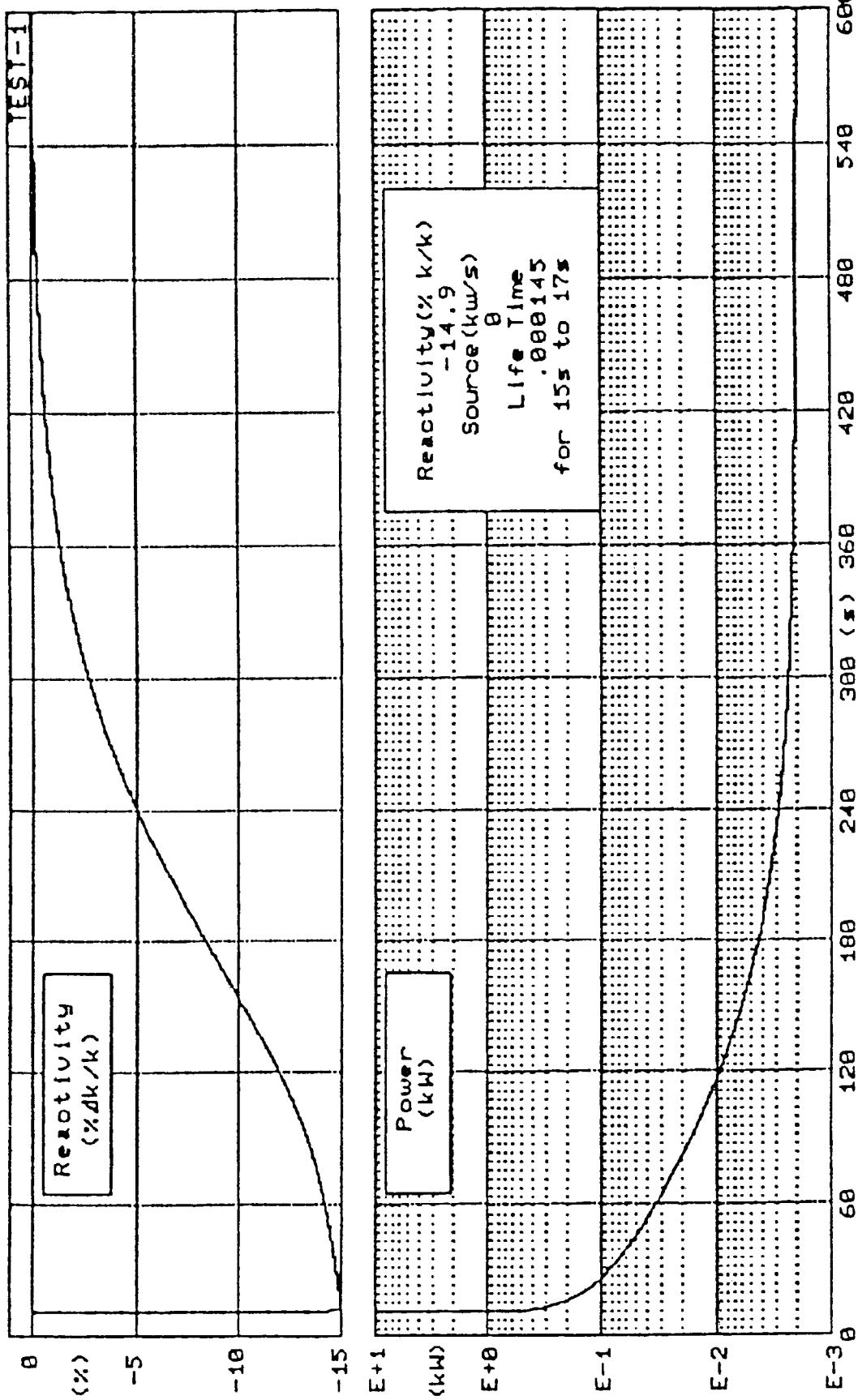
第3.1図 ステップ応答データの遅れ補正結果(スムージング無し)



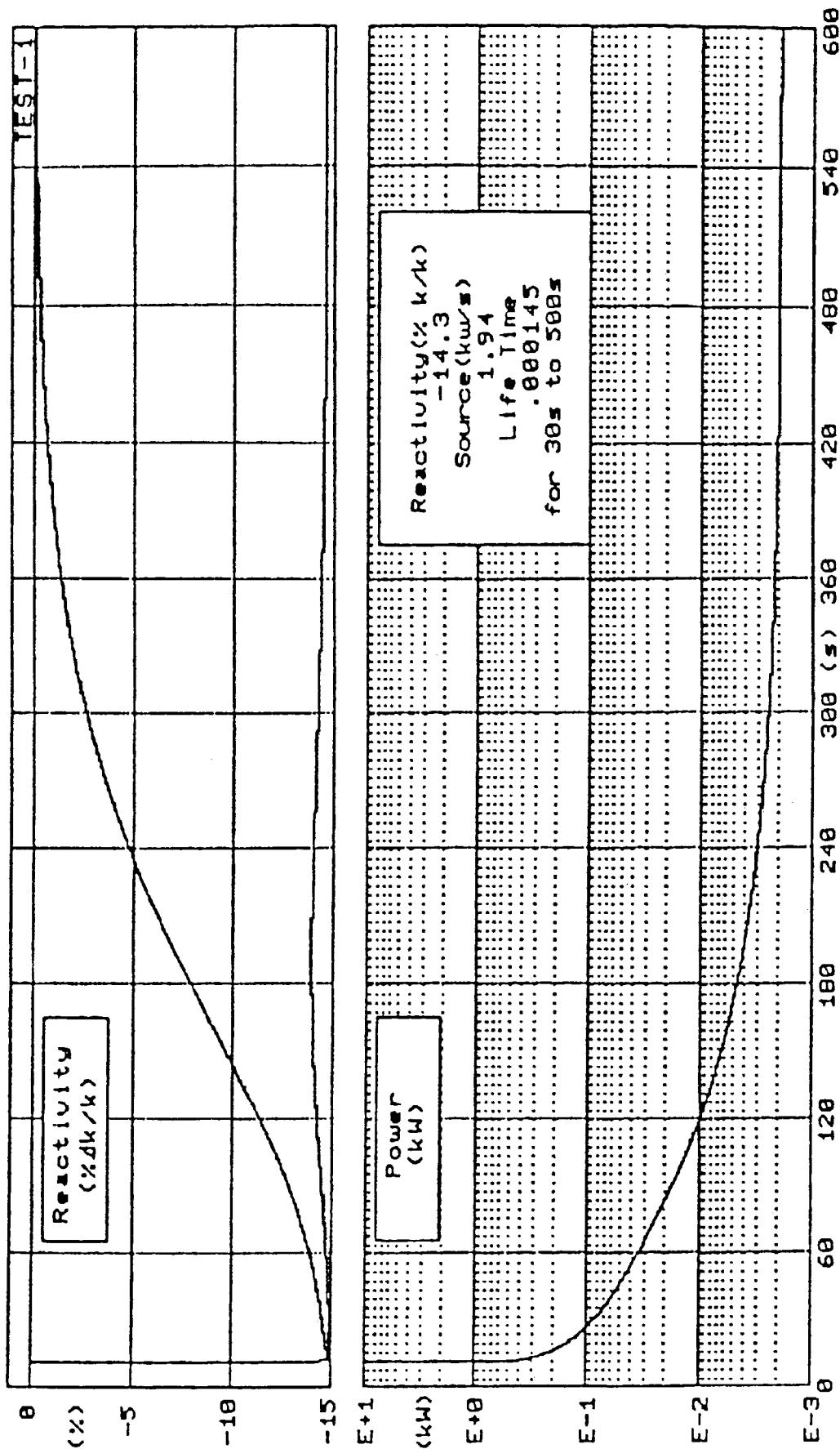
第3.2図 ステップ応答データの遅れ補正結果(スムージング有り)



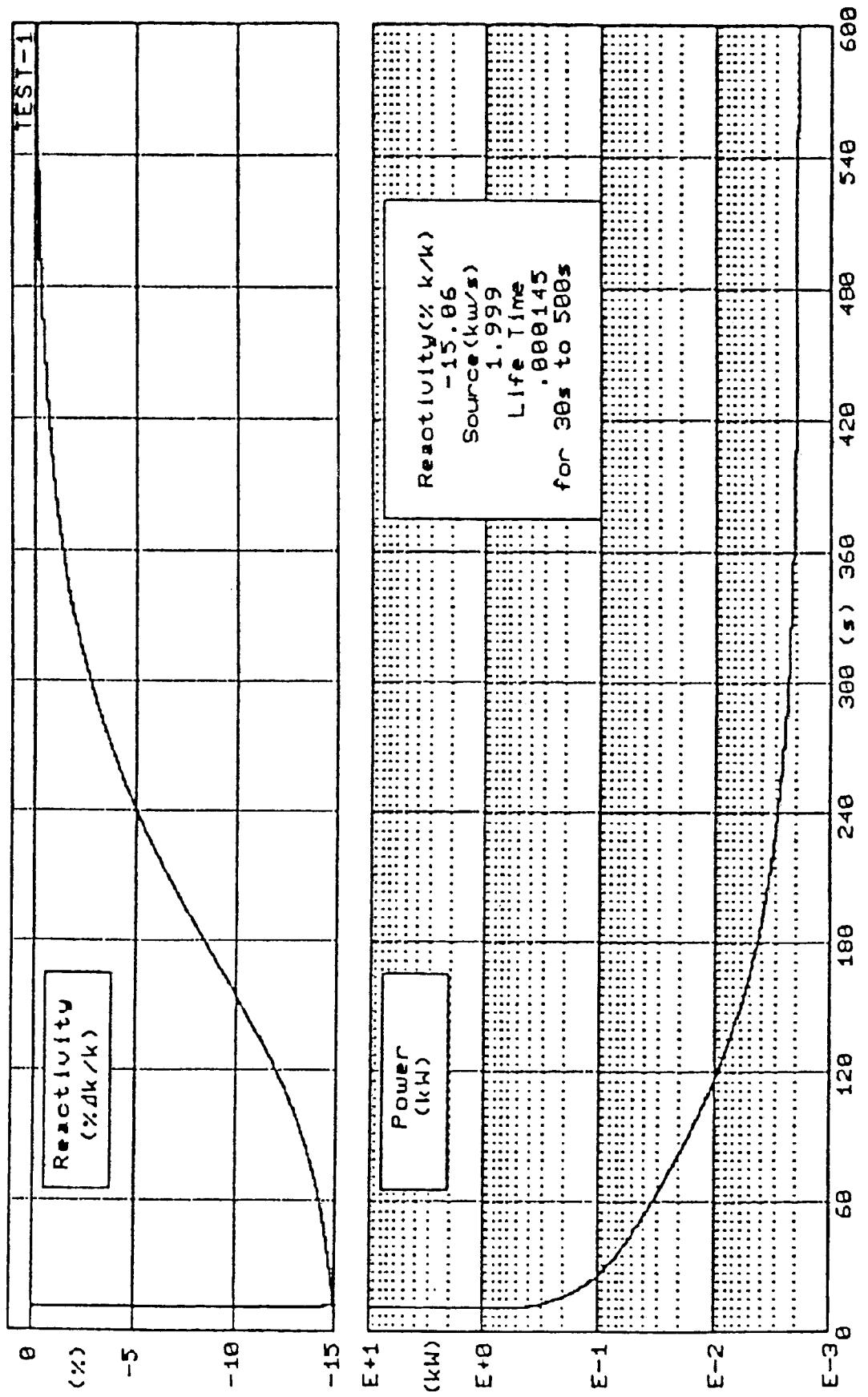
第3.3図 模擬信号の反応度、中性子源評価結果(遅れ補正なし、中性子源補正なし)



第3.4図 模擬信号の反応度、中性子源評価結果(遅れ補正あり、中性子源補正なし)



第3・5図 模擬信号の反応度、中性子源評価結果(遅れ補正なし、中性子源補正あり)



第3.6図 模擬信号の反応度、中性子源評価結果(遅れ補正あり、中性子源補正あり)

4. 測定結果

測定結果は、JRR-3M シリサイド燃料初装荷炉心の特性試験時（平成 11 年 11 月）に取得した制御棒落下法による試験の 4 測定データ及び特性試験後に 3 サイクルの共同利用運転（1 サイクルは、原子炉出力 20MW の 26 日間連続運転である。）を行い平成 12 年 6 月期の JRR-3 定期自主検査時に取得した制御棒落下法による試験の 1 測定データの計 5 測定データについて、新たに開発した対数増幅器遅れ応答の補正及び中性子源強度を考慮した IKRD 法による原子炉停止余裕の再評価を行ったものである。

JRR-3M は、原子炉出力 20MW の重水反射体タンク付き軽水減速軽水冷却型の研究用原子炉である。炉心部は、26 体の標準型燃料要素、6 体の制御棒、ベリリウム反射体等により構成し、周囲に重水反射体タンクを配置している。JRR-3M の概要を第 4.1 図に、主要諸元を第 4.1 表に示す。

IKRD 法による原子炉停止余裕の測定は、既設または仮設の γ 線補償形電離箱⁽⁸⁾（以下 CIC と略す。）の中性子検出器及び対数増幅器を用いて計測した中性子信号をパーソナルコンピュータで演算処理する反応度測定装置の機器構成で行った。

4. 1 試験条件

試験は、所定の原子炉出力で全制御棒の引き抜き位置が同一位置の臨界状態から、手動スクラム操作により全制御棒全挿入の所要時間 1 秒以内で炉心内への制御棒急速挿入を行うことにより、臨界状態から約 200 秒間の中性子信号の減衰を計測する手順で行った。JRR-3M 制御棒の炉心急速挿入曲線図を第 4.2 図に示す。

試験条件は、制御棒炉心挿入前の原子炉出力、中性子検出器の炉心軸方向設置位置、炉心の冷却方式等をパラメータとした。

炉心の冷却方式は、自然循環冷却と主ポンプ強制循環冷却がある。この冷却方式の違いにより、手動スクラム操作時の制御棒緊急挿入時間に約 0.2 秒の差が生じるが、測定結果に影響を与えるものではない。

制御棒の炉心挿入前の原子炉出力は、JRR-3M シリサイド燃料初装荷炉心の特性試験⁽¹⁰⁾時に 10W, 20W, 100W, 10 kW 及び 3 サイクルの共同利用運転後の JRR-3 定期自主検査時に 10kW にて 10 分間以上の出力保持を行った。制御棒落下法による試験時の各試験名称毎の試験条件について第 4.2 表に示す。

中性子検出器の炉心軸方向設置位置は、制御棒炉心挿入前の原子炉出力 10W, 10 kW の場合には軸方向の炉心中心近傍位置、制御棒炉心挿入前の原子炉出力 20W, 100W の場合には炉心上部近傍位置となる制御棒炉心挿入前の制御棒引き抜き位置に比し約 8cm～約 85cm 上方とした。また、制御棒炉心挿入前の原子炉出力 10W, 10 kW での中性子検出器の炉心軸方向設置位置は、JRR-3M シリサイド燃料初装荷炉心の特性試験における熱中性子束分布測定試験結果に基づくと炉心部軸方向熱中性子束分布のピーク位置（炉心中心から -23cm）に比し、約 18cm 上方である。炉心部の中性子検出器配置について第 4.3 図に示す。

冷却方式は、制御棒炉心挿入前の原子炉出力 10W, 20W, 100W の場合には自然循環による炉心冷却

方式で、制御棒炉心挿入前の原子炉出力 10 kW の場合には 1 次冷却材主ポンプ強制循環による炉心冷却方式である。

計測系統は、中性子検出器に CIC、電流信号の電圧変換・増幅に対数増幅器を用いた中性子計測系及び原子炉停止余裕算出に反応度測定装置を用いる構成とした。制御棒炉心挿入前の原子炉出力 10W, 20W, 100W の場合には、仮設中性子計測系を用いた。制御棒炉心挿入前の原子炉出力 10 kW 時は、既設の中性子計測系である対数出力炉周期系を用いた。仮設中性子計測系は、仮設の中性子検出器を重水反射体タンクの実験孔内に配置し仮設の対数増幅器を用いることにより、特性試験時の低出力に対応した。既設の対数出力炉周期系は、中性子検出器を重水反射体タンクの外周に配置している。

仮設中性子計測系及び既設の対数出力炉周期系で用いている中性子検出器は、計測範囲、熱中性子感度等について同等の特性を有している。対数増幅器は、入力電流値に対する出力電圧値が仮設中性子計測系の $10^{-12} \text{ A} \sim 10^{-4} \text{ A}$ / $0 \text{ V} \sim 8 \text{ V}$ に比して既設の対数出力炉周期系では $10^{-11} \text{ A} \sim 10^{-3} \text{ A}$ / $0 \text{ V} \sim 8 \text{ V}$ と入力電流値が 1 衍高い設定である。制御棒炉心挿入前の原子炉出力における対数増幅器の入力電流値は、約 10^{-7} A を目標とした。

反応度測定装置は、仮設または既設の対数増幅器からの電圧信号を絶縁増幅器、A-D 変換器⁽¹¹⁾を介して 0.1 秒周期で収録し、オフライン処理にて原子炉停止余裕の算出を行う。収録データは、臨界状態を 30 秒以上、手動スクラム後を 200 秒以上とする収録時間を目標に連続データ取得を行った。また、測定プログラムは、オペレーションシステム (OS) に DOS (米国マイクロソフト社の登録商標) を用いて処理速度の高速化を図り、データの収録・処理等を CRT 対話形で行う測定時の操作が確実かつ容易である機能を有している。計測系統の主要仕様を第 4.3 表および計測系統の構成を第 4.4 図に示す。

4. 2 結果

測定データの中性子信号には、核分裂反応に起因する中性子信号成分に加え、ベリリウム反射体領域と重水反射体領域で γ -n 反応により生ずる中性子（定在する中性子源）の信号成分、対数増幅器の遅れ応答成分の混入が考えられる。ただし、 γ 線による信号成分は、中性子検出器に γ 線補償形を用いることから測定データの中性子信号に影響を与えない。また、電気的雑音による影響は、ハード的、ソフト的な処理により適宜低減化を図った。そこで、対数増幅器の遅れ応答成分が測定結果に及ぼす影響を確認するために、中性子源による影響のみを考慮する手法と新たに開発した対数増幅器の遅れ応答を修正した中性子信号を用いて中性子源を考慮する手法とによる測定結果を比較する。また、原子炉停止余裕算出結果について試験条件による影響を確認した。

(1) 中性子源による影響を考慮した場合のみの測定結果

計測した中性子信号には、中性子源による影響のみが含まれていると仮定して、(2.10) 式により原子炉停止余裕を算出した。反応度測定装置の操作手順は、 ρ' を算出し S を最小自乗法により求め ρ の算出を行った。

中性子信号は、制御棒炉心挿入前の原子炉出力 10W～10 kW に対して対数増幅器の入力電流値が約 $10^{-7} \text{ A} \sim$ 約 10^{-6} A で対数増幅器の特性による影響が同程度となるような中性子検出器の配置であり、制御棒急速挿入により 3 衍以上の減衰曲線として計測できた。反応度測定装置による中性子信号の計測結果を第 4.5 図～第 4.9 図に示す。

反応度算出結果は、炉心への制御棒急速挿入によりステップ状に負の反応度が投入されたにもかかわらず、算出した反応度（N/S 修正後）が時間経過に伴い一定値を示していないことから中性子源以外の影響があることを示す結果を得た。中性子源を考慮する前後（N/S 修正前後）の反応度算出結果の時間経過を第 4.10 図～第 4.14 図に示す。

原子炉停止余裕の測定結果は、制御棒炉心挿入前の原子炉出力が異なっても同程度の結果を得た。ただし、炉心軸方向の中性子検出器設置位置を炉心から上方に配置した試験名称 R3100W02、R320W-01 では、炉心中心位置近傍に配置した試験名称 R3Log-01、R3-10W03 の場合に比し、炉心部との中性子変化を比例的に計測できないことから原子炉停止余裕が約 30% 減少となる中性子検出器軸方向設置位置に大きく依存した測定結果を得た。中性子源による影響のみを考慮した場合の原子炉停止余裕測定結果を第 4.4 表に示す。

（2）対数增幅器の遅れ応答を補正した場合の測定結果

計測した中性子信号には、中性子源と対数增幅器の遅れ応答の影響が含まれていると仮定して、(2.16) 式、(2.10) 式により原子炉停止余裕を算出した。反応度測定装置の操作手順は、計測した中性子信号をあらかじめ確認した対数增幅器の遅れ応答特性を用いて補正した後に、 ρ' を算出し中性子源強度（S）を最小自乗法により求め対数增幅器の遅れ応答を補正した場合の反応度（ ρ ）の算出を行った。対数增幅器遅れ応答時間（ τ ）は、仮設対数增幅器で 354.7 秒、既設対数增幅器で 100 秒とした。

対数增幅器の遅れ応答を補正した中性子信号は、遅れ応答が顕著となる対数增幅器の入力電流値 $10^{-10} A$ 以下に対応した反応度測定装置の入力信号電圧値 2V 以下について遅れ応答を修正した効果が顕著となる想定通りの結果を示した。対数增幅器の遅れ応答の補正前後の中性子信号について第 4.15 図～第 4.19 図に示す。

反応度算出結果は、炉心への制御棒急速挿入によりステップ状に負の反応度が投入された反応度の時間経過をよく示す結果を得た。中性子源を考慮する前後（N/S 修正前後）の対数增幅器の遅れ応答を補正した場合の反応度算出結果について第 4.20 図～第 4.24 図に示す。

原子炉停止余裕の測定結果は、制御棒炉心挿入前の原子炉出力が異なっても相対比 0.5% 以内と良く一致した結果を得た。また、対数增幅器の遅れ応答を修正することにより中性子源による影響を考慮した場合のみの測定結果に比し、原子炉停止余裕が 2 % 以上増加した結果を得た。ただし、試験名称 R3100W02、R320W-01 の原子炉停止余裕は、試験名称 R3Log-01、R3-10W03 に比し、原子炉停止余裕が約 30% 減少した値で炉心軸方向の中性子検出器設置位置に大きく依存している測定結果を得た。3 サイクルの共同利用運転後における試験の試験名称 R310 k W11 は、可燃性中性子吸收体（カドミウム）の燃焼により、原子炉停止余裕が約 5% 低下した測定結果を得た。対数增幅器の遅れ応答を修正した場合の原子炉停止余裕測定結果を第 4.5 表に示す。

（3）考察

新たに開発した IKRD 法を用いた JRR-3M における原子炉停止余裕の測定は、中性子源による影響を考慮した場合のみの手法により $12.96\% \Delta k/k$ 、対数增幅器の遅れ応答を補正した中性子信号を用いて中性子源を考慮する手法により $13.20\% \Delta k/k$ の測定結果が得られたことから、原子炉停止余裕測定結果で相対比 2% 以上の測定精度の向上を図ることができる手法であることを確認した。

試験条件による測定結果への影響は、制御棒炉心挿入前の原子炉出力及び炉心径方向の中性子検出器設置位置が異なっても相対比 0.3%～0.6%と大差のない原子炉停止余裕の測定結果を示すが、中性子検出器設置位置が炉心軸方向で約 80cm 異なる場合は炉心中心位置近傍に比し、炉心上方位置近傍では相対比約 30%減少する原子炉停止余裕の測定結果結果を示した。このことは、炉心部の中性子変化に比例した中性子変化を検出できない炉心軸方向の中性子検出器設置位置に大きく依存することを示し、IKRD 法を用いる測定手法に起因することを示した。

JRR-3M シリサイド燃料初装荷炉心の特性試験に続いた 3 サイクルの共同利用運転後は、臨界時制御棒位置が共同利用運転前に比し炉心に約 5cm 深く挿入され、燃料要素に配置した可燃性中性子吸収材の燃焼により原子炉停止余裕が約 $13.2\% \Delta k/k$ から約 $12.5\% \Delta k/k$ に約 5% 減少したことを明らかにした。

第4. 1表 JRR-3M の主要諸元

目的	中性子ビーム実験、原子炉用燃料・材料照射試験、RI 製造、放射化分析等
炉型式	低濃縮ウラン軽水減速冷却プール型
熱出力	20MW
最大熱中性子束	$3 \times 10^{14} \text{ n/cm}^2 \cdot \text{sec}$
炉心の形状	円柱型 直径 : 0.6m、高さ : 0.75m
制御棒	ハフニウム : 6 体
燃料	シリサイド燃料: 標準燃料要素 26 体、フォロア型燃料要素 6 体

第4. 2表 試験条件

試験名 (試験年月日)	臨界時 原子炉出力	臨界時 制御棒位置 (mm)	中性子検出器 軸方向設置位置	中性子検出器 径方向設置位置	計測系統	臨界時の対数増 幅器入力電流 (A)	冷却方式
R3Log 01 ('99-11-16)	10 kW	275	炉心中心近傍 (+5cm)	重水タンク外周	対数出力炉 周期系	約 9×10^{-8}	自然循環冷却 26.0°C
R3-10W 03 ('99-11-05)	10W	263	炉心中心近傍 (-5cm)	重水タンク内	仮設中性子 計測系	約 6×10^{-7}	自然循環冷却 23.7°C
R310 kW 11 ('00-6-26)	10 kW	224	炉心中心近傍 (+5cm)	重水タンク外周	対数出力炉 周期系	約 9×10^{-8}	主ボンプ強制循 環冷却 炉心平均 19.2°C
R3100W 02 ('99-9-29)	100W	265	炉心上方近傍 (+72.5cm)	重水タンク内	仮設中性子 計測系	約 4×10^{-7}	自然循環冷却 30.2°C
R320W-01 ('99-9-28)	20W	266	炉心上方近傍 (+72.5cm)	重水タンク内	仮設中性子 計測系	約 6×10^{-8}	自然循環冷却 30.6°C

第4.3表 計測系統の主要仕様

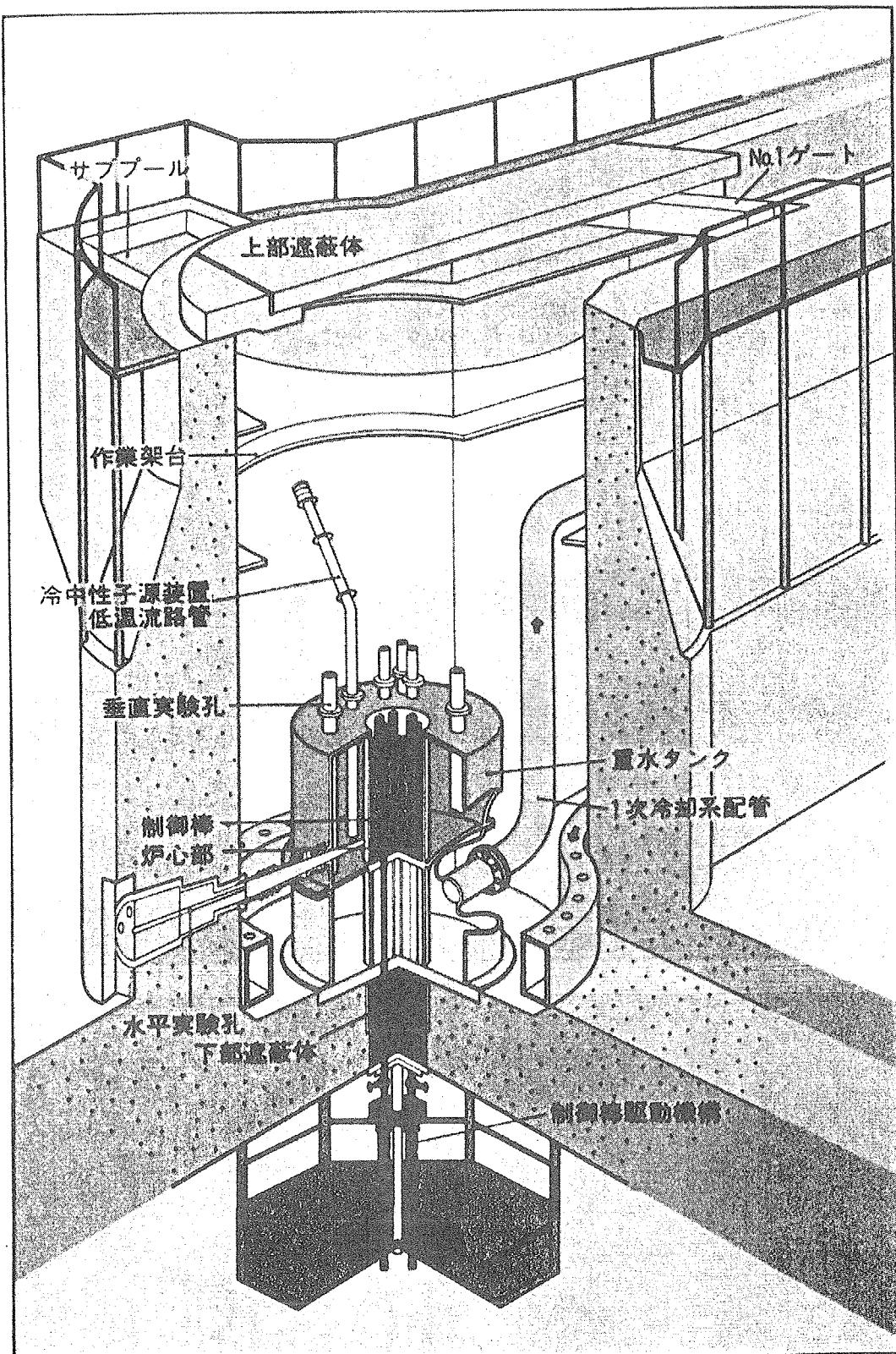
機器名	仕様
中性子検出器	<p>形式：γ線補償形電離箱 (CIC) 型式：WL-23196</p> <p>外形：直径約5cm、長さ約30cm 熱中性子感度：約2.3×10^{-14} A/nv 計測範囲：$\sim 1 \times 10^{11}$ nv メーカー：IST</p>
対数増幅器	<p>形式：FET入力、対数ダイオード 型式：802</p> <p>入力：$10^{-12} \sim 10^{-4}$ A 出力：0~8 V 直線性：± 0.1 デカード メーカー：Ikegami</p>
反応度測定装置	<p>(1) アナログ入力カード 型式：ADXM-98FX 入力：0~± 10V/16bit 精度：0.1%FS メーカー：カノープス</p> <p>(2) 演算処理装置 型式：デスクトップ CPU：PC-9821Xa10/k8 CPU：100MHz メモリ：ROM96 kB、RAM16MB Disk：850MB CRT：17インチカラー メーカー：NEC</p>

第4. 4表 中性子源による影響のみを考慮した場合の炉停止余裕測定結果

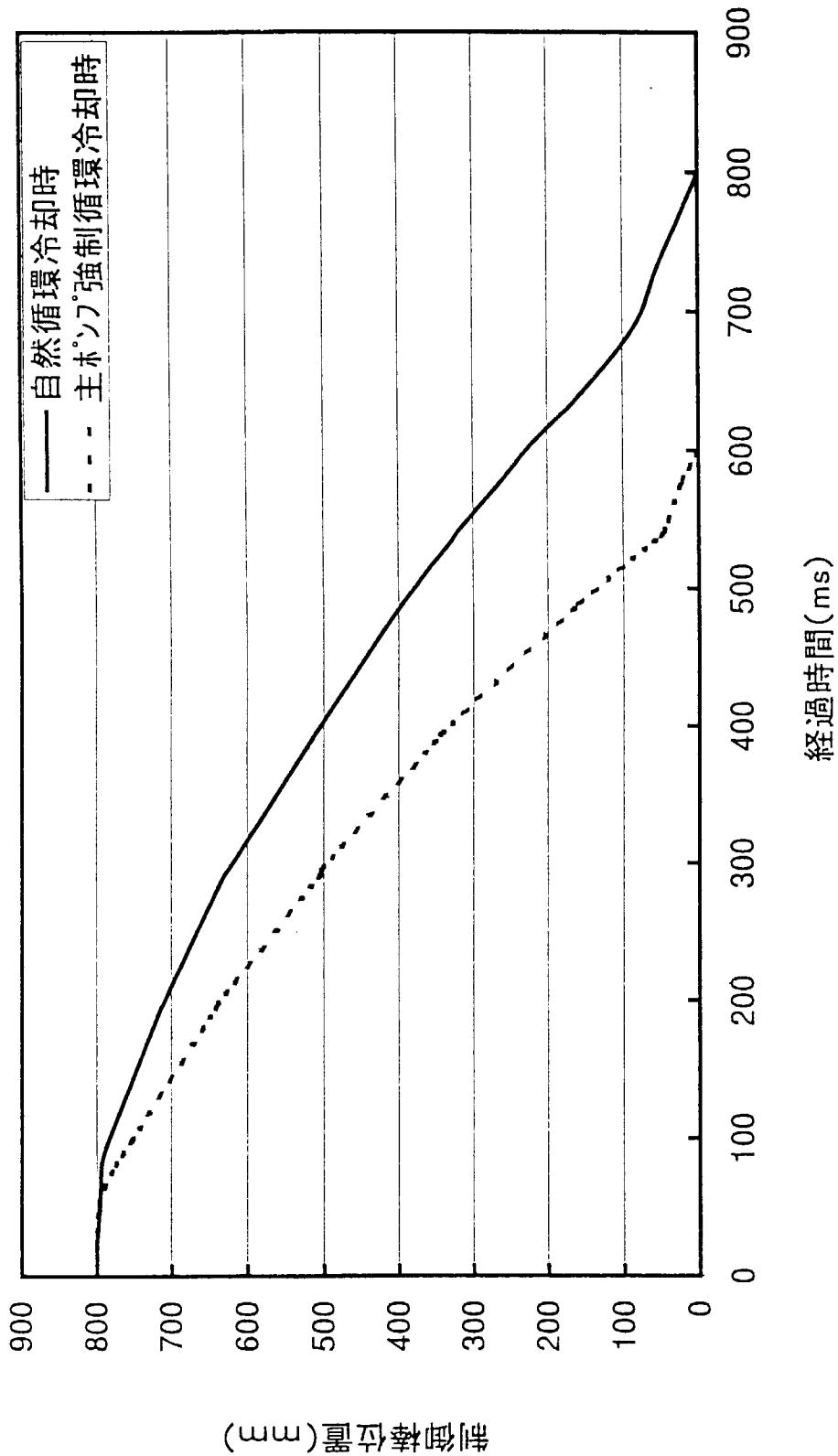
試験名称 (試験年-月-日)	臨界時 原子炉出力	評価範囲 (指定時間幅) (s)	炉停止余裕 (% Δ k/k)	中性子源強度 (kW/s)	決定率 (%)
R3Log-01 (99-11-16)	10 k W	22~140 (118)	-12.960	3.32	99.02
R3-10W 03 (99-11-05)	10W	22~120 (98)	-13.016	3.03E-03	92.42
R310 k W 11 (00-6-26)	10 k W	96~220 (124)	-12.100	1.64	97.47
R3100W 02 (99-9-29)	100W	22~140 (118)	-9.376	2.73E-02	96.33
R320W -01 (99-9-28)	20W	36~140 (104)	-9.418	1.12E-03	98.55

第4・5表 対数増幅器の遅れ応答を修正した場合の炉停止余裕測定結果

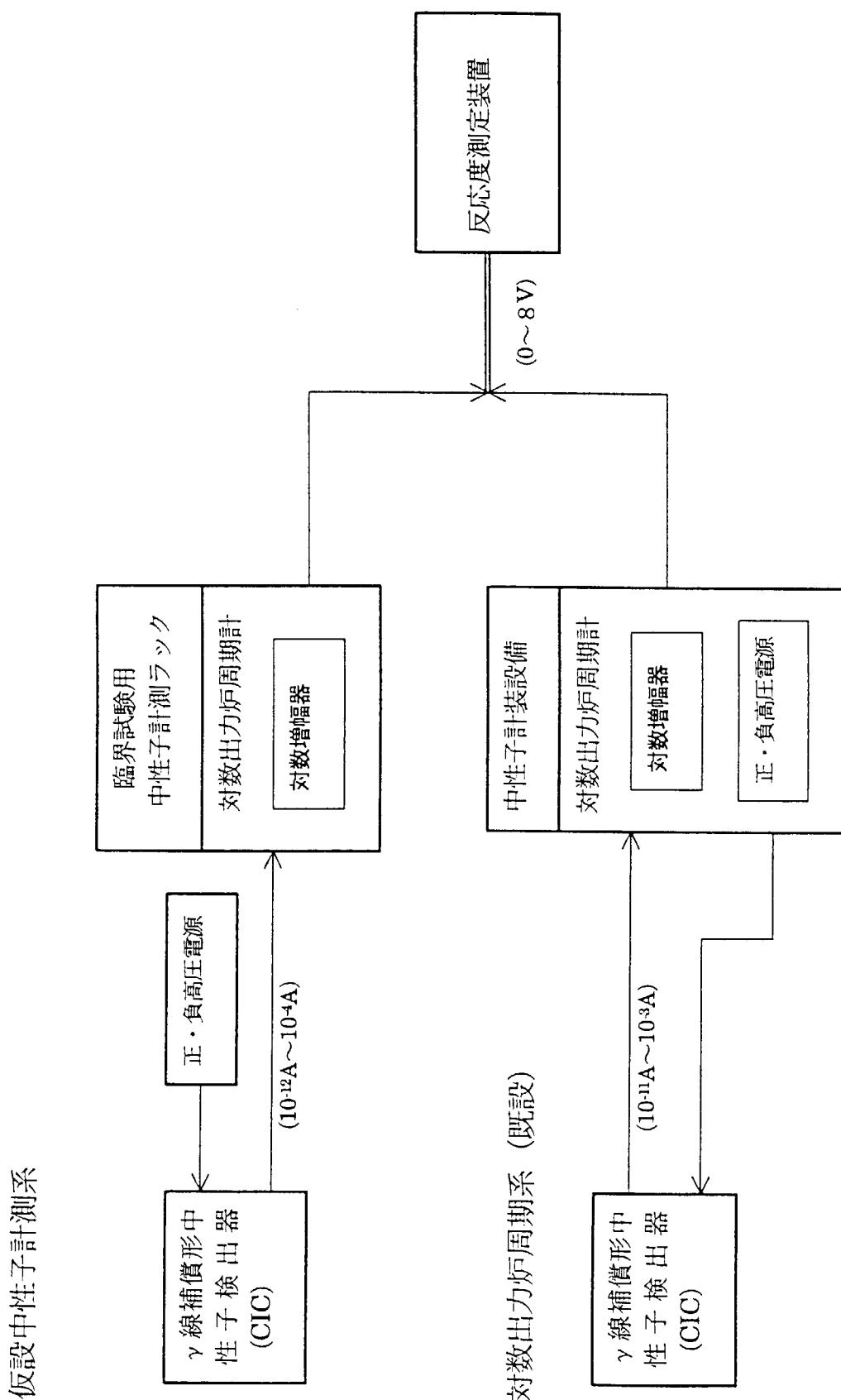
試験名稱 (試験年-月-日)	臨界時 原子炉出力	遅れ応答時間 (s)	評価範囲 (指定時間幅) (s)	炉停止余裕 (%Δk/k)	中性子源強度 (kW/s)	決定率 (%)
R3Log-01 (99-11-16)	10 kW	100	35～280 (145)	-13.215	2.08	99.13
R3-10W 03 (99-11-05)	10W	354.7	34～90 (56)	-13.269	5.15E-03	95.02
R310 kW 11 (00-6-26)	10 kW	100	107～240 (133)	-12.509	4.81E-02	82.83
R3100W 02 (99-9-29)	100W	354.7	34～100 (56)	-9.580	4.09	96.73
R320W -01 (99-9-28)	20W	354.7	50～130 (80)	-9.612	9.05E-04	96.83



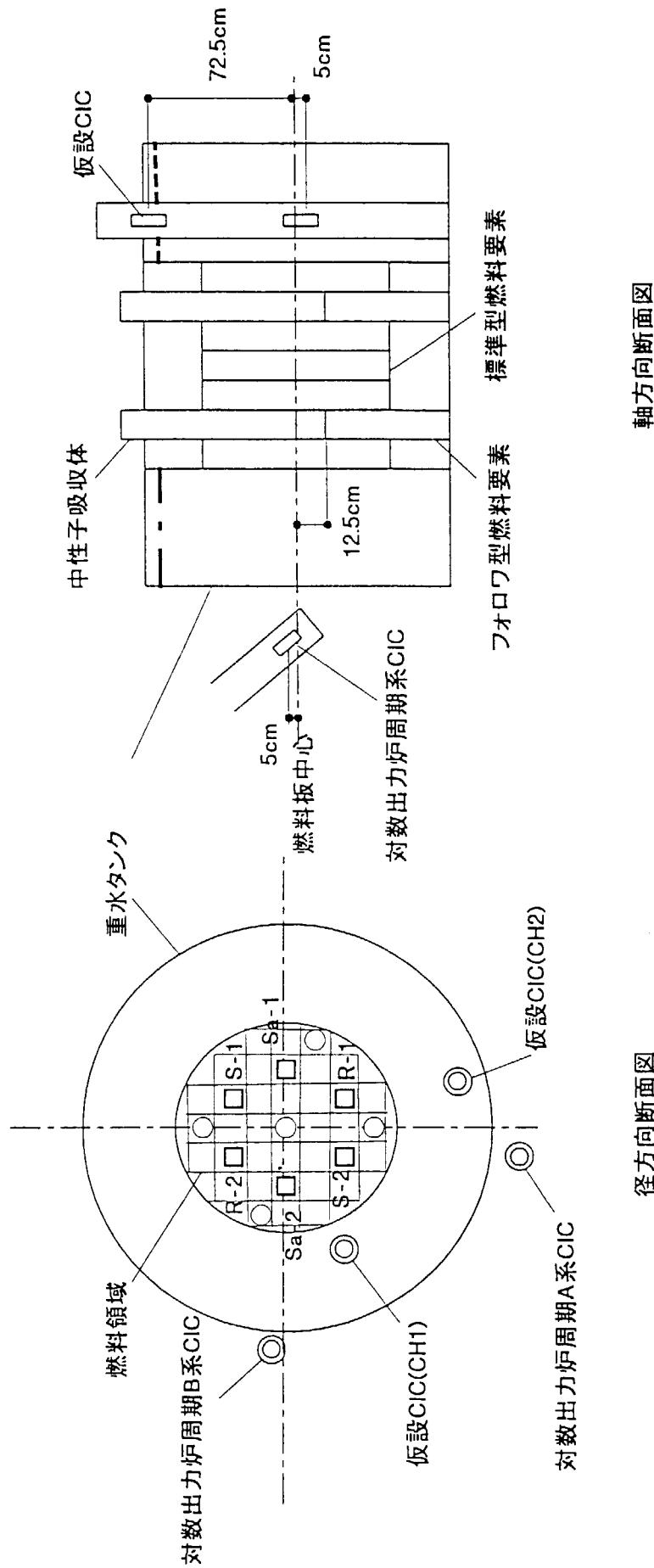
第4.1図 JRR-3M の概要

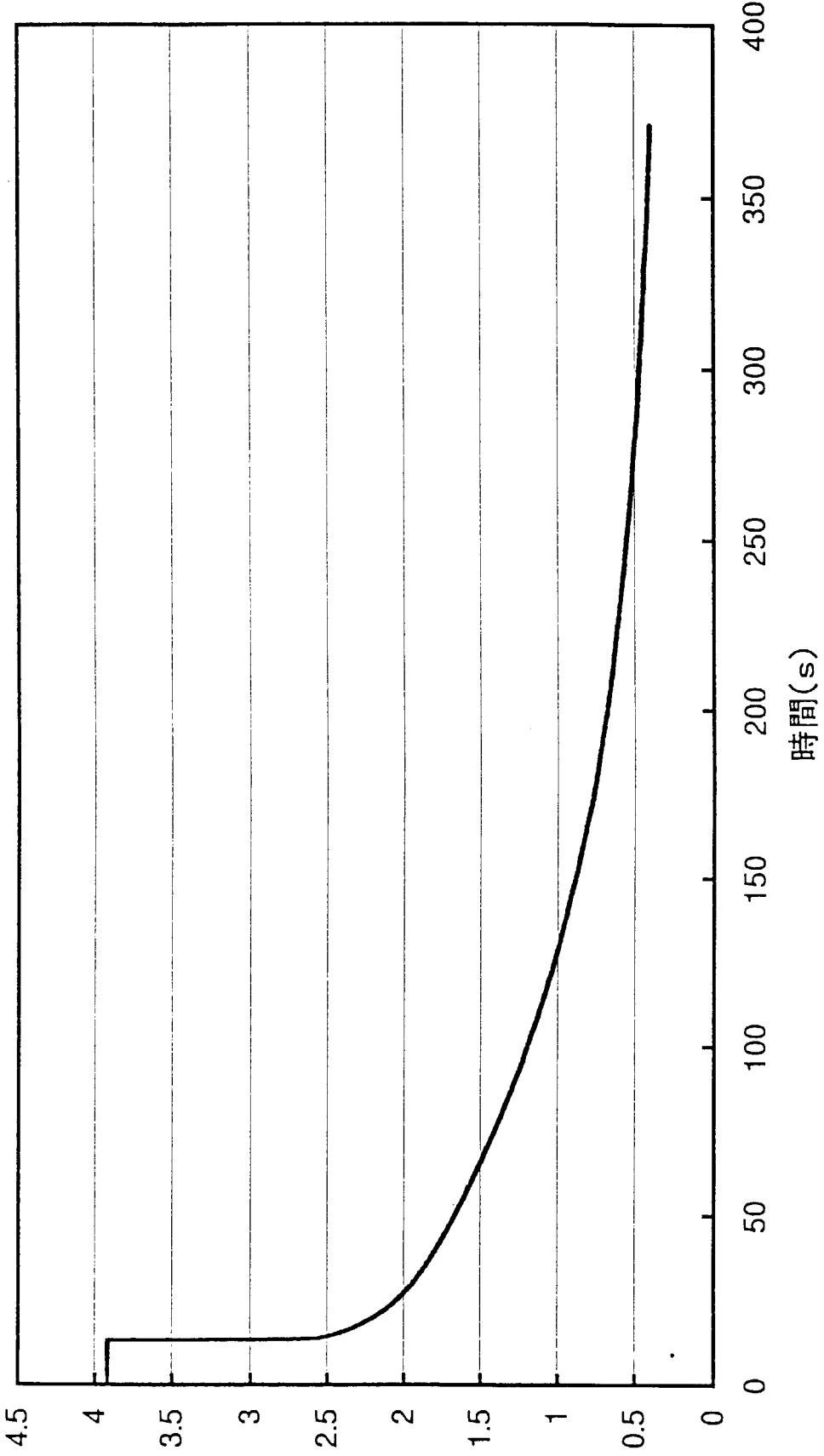


第4.2図 制御棒炉心急速挿入曲線

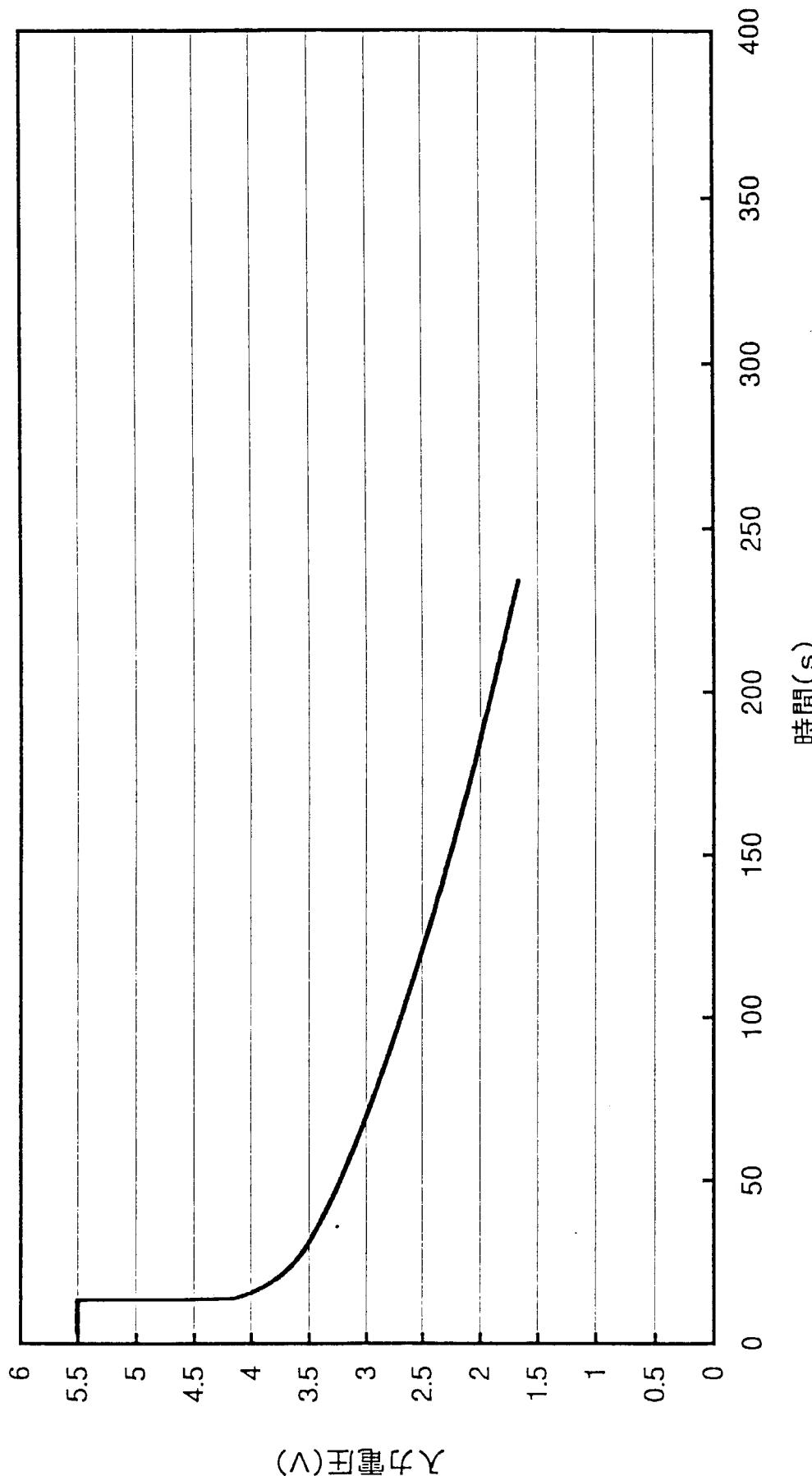


第4.3図 原子炉停止余裕測定時の計測系統の構成

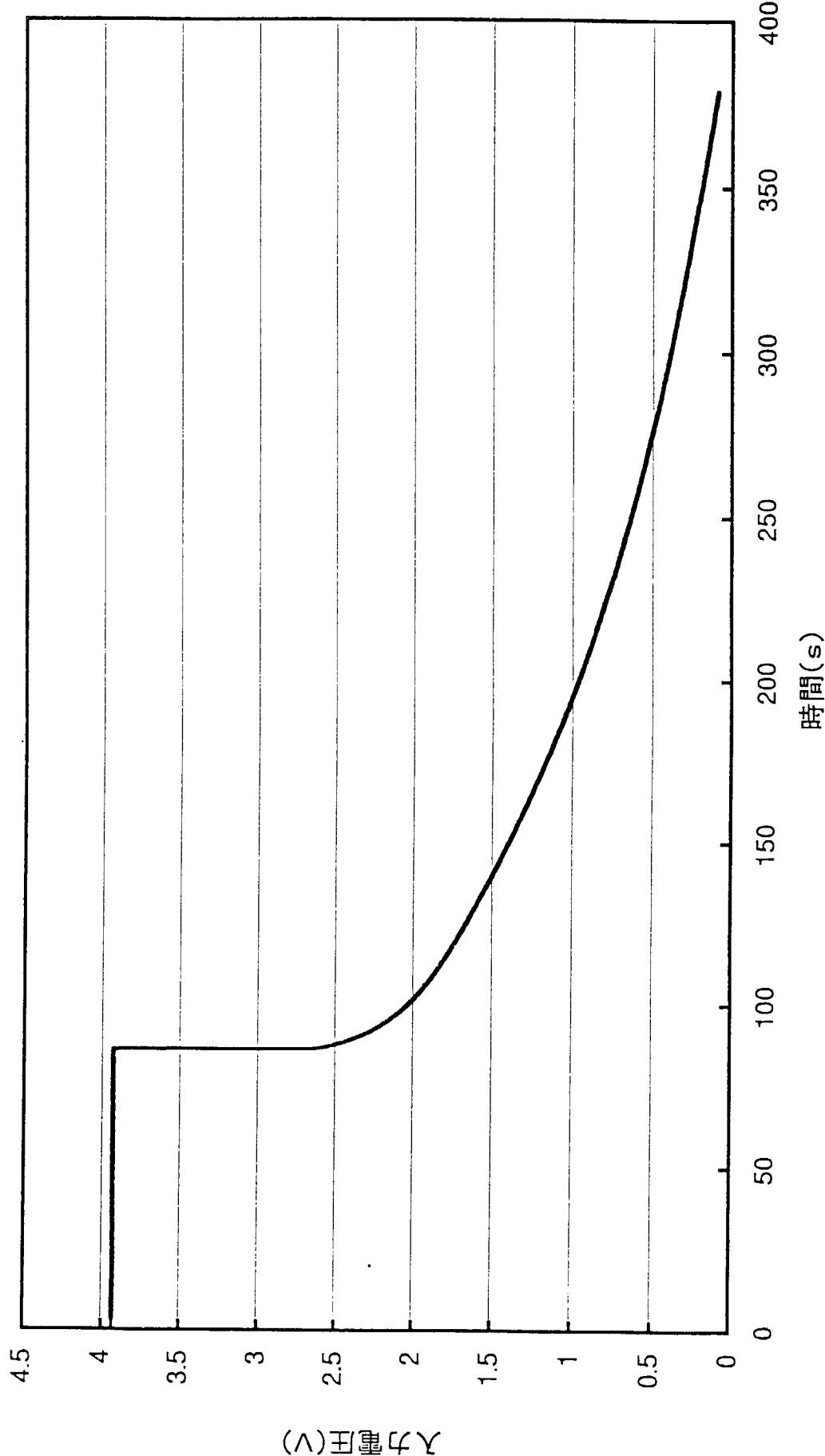




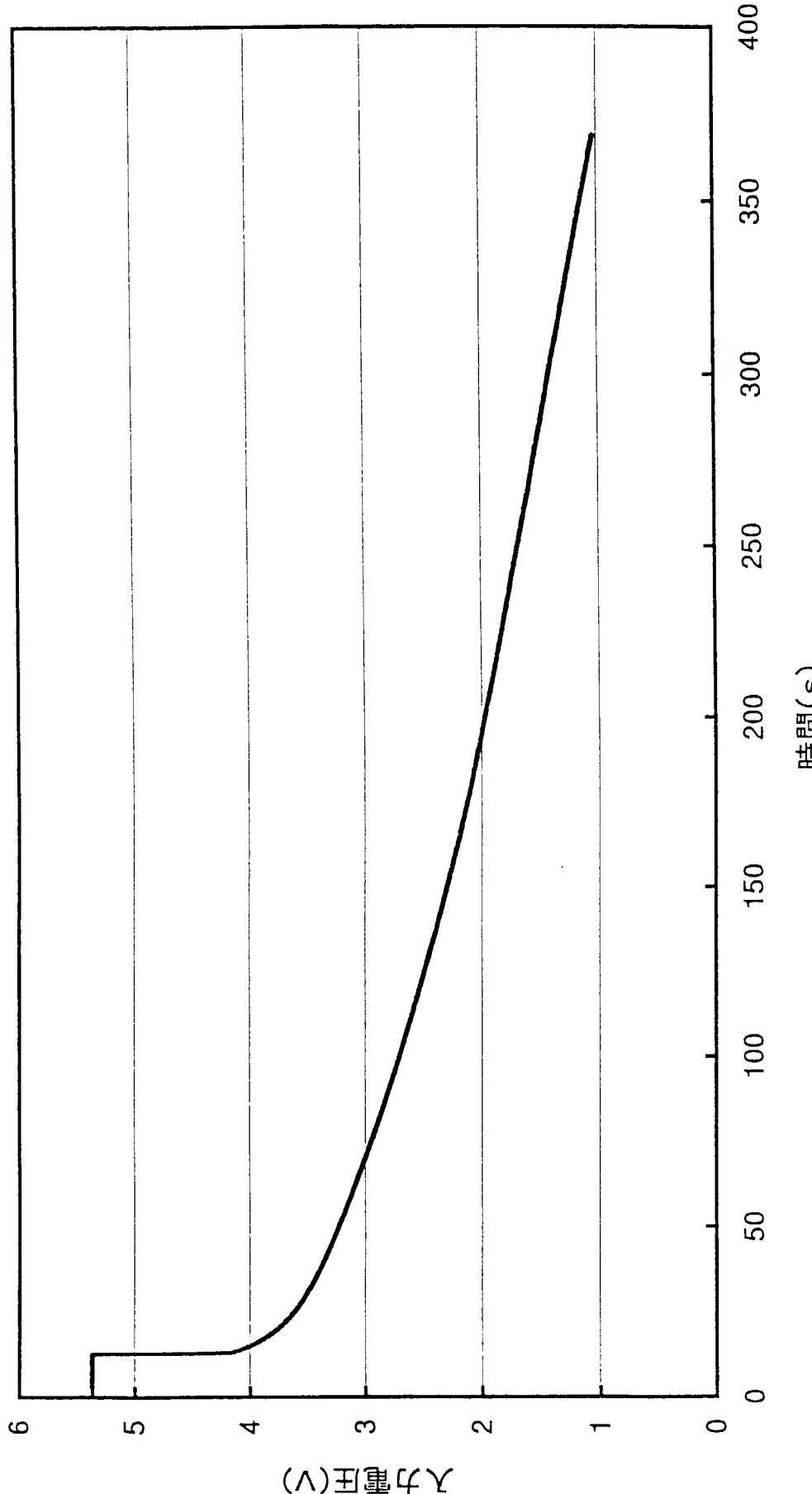
第4.5図 中性子信号計測結果(R3Log-01-10kW)



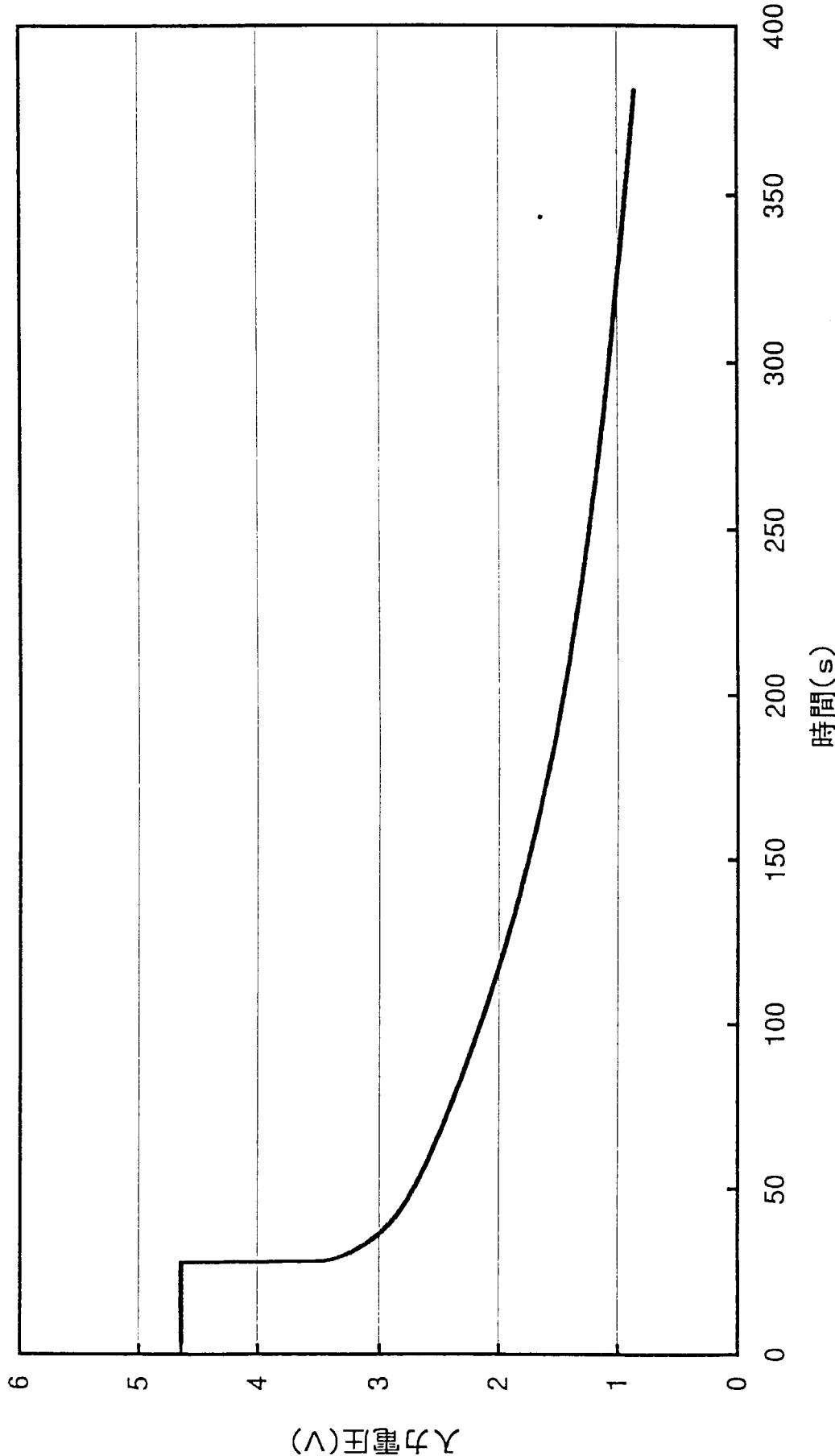
第4.6図 中性子信号計測結果(R310W03・10W)



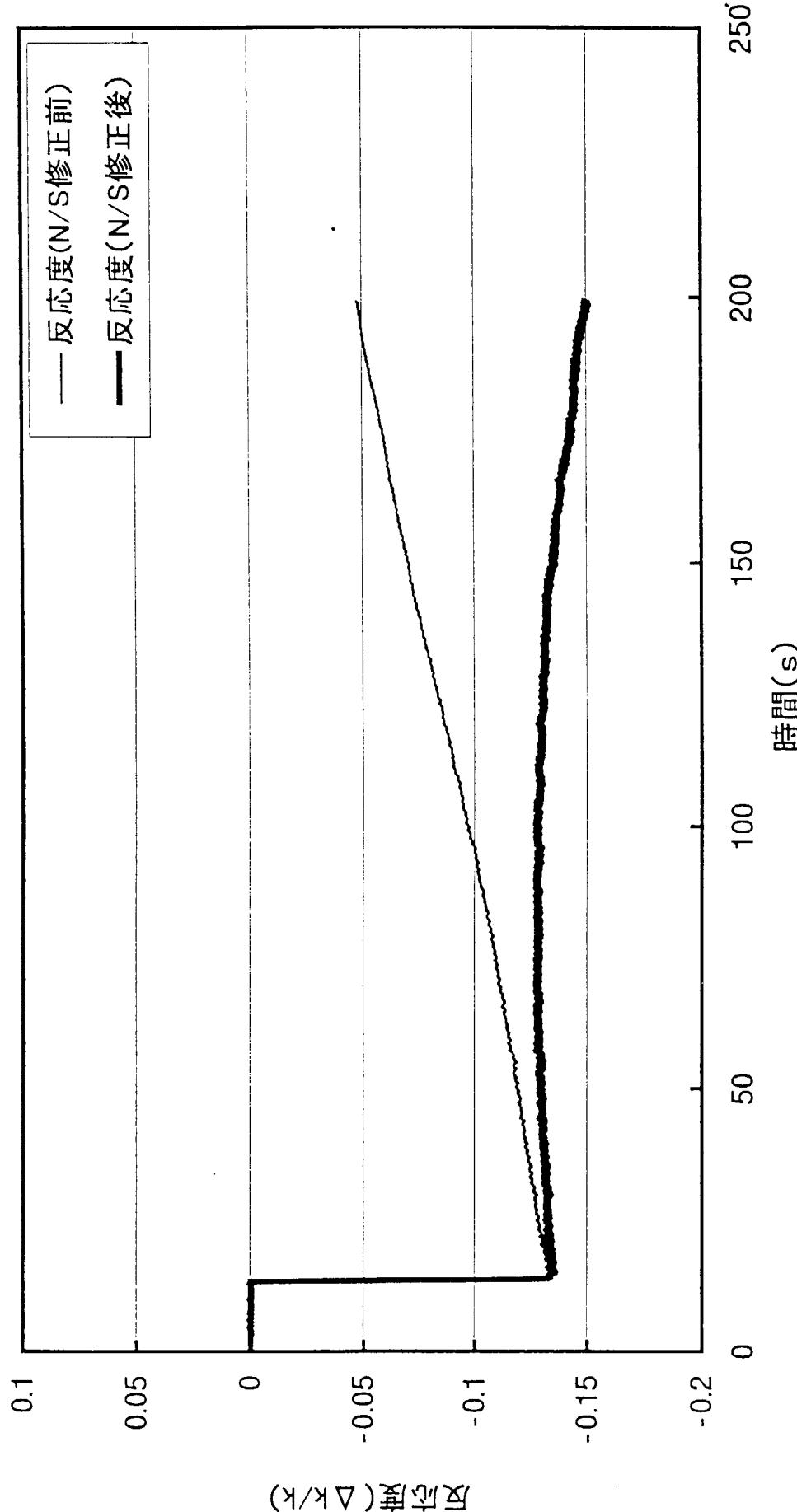
第4.7図 中性子信号計測結果 (R310kW11・10kW)



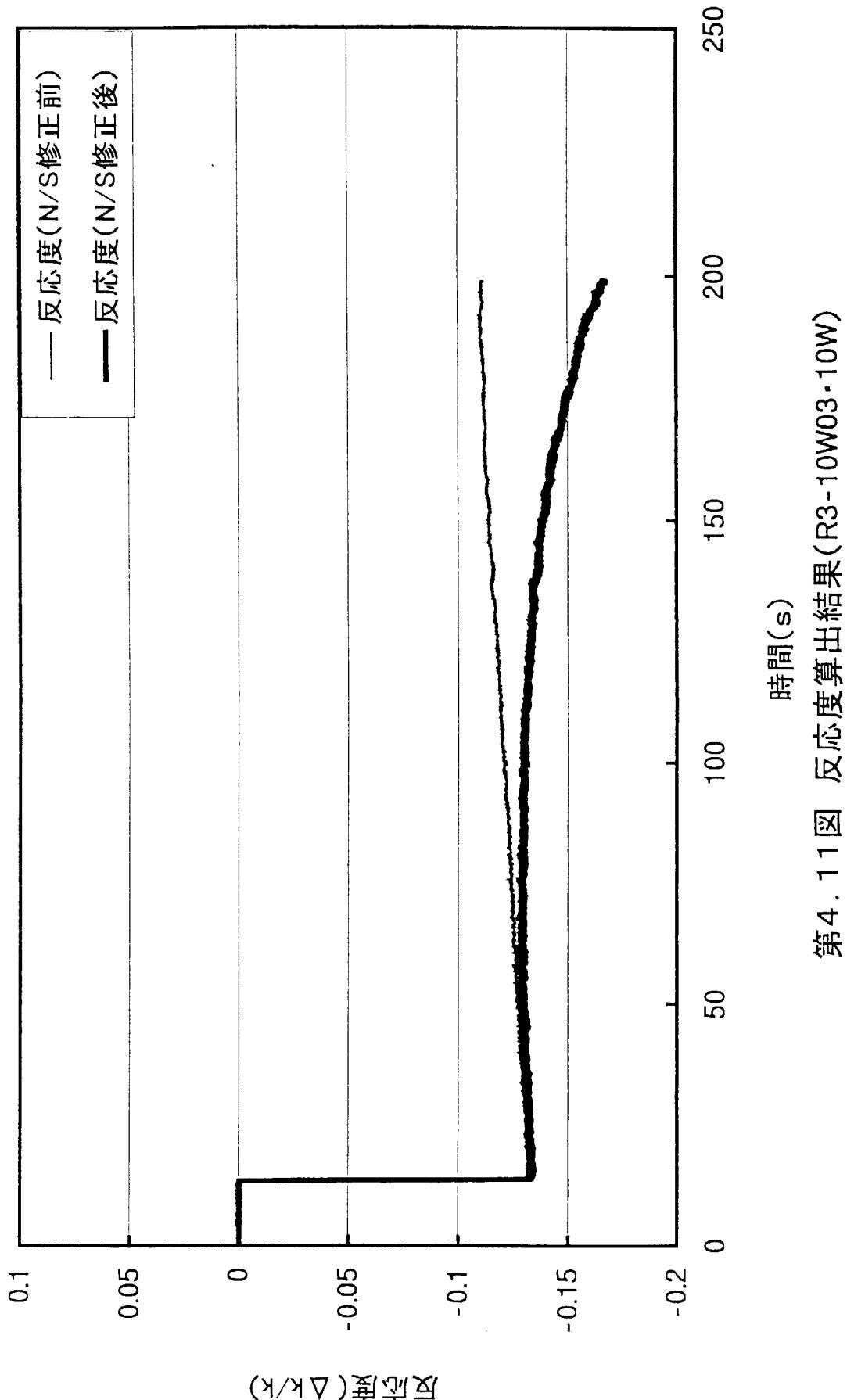
第4.8図 中性子信号計測結果(R3100W02・100W)

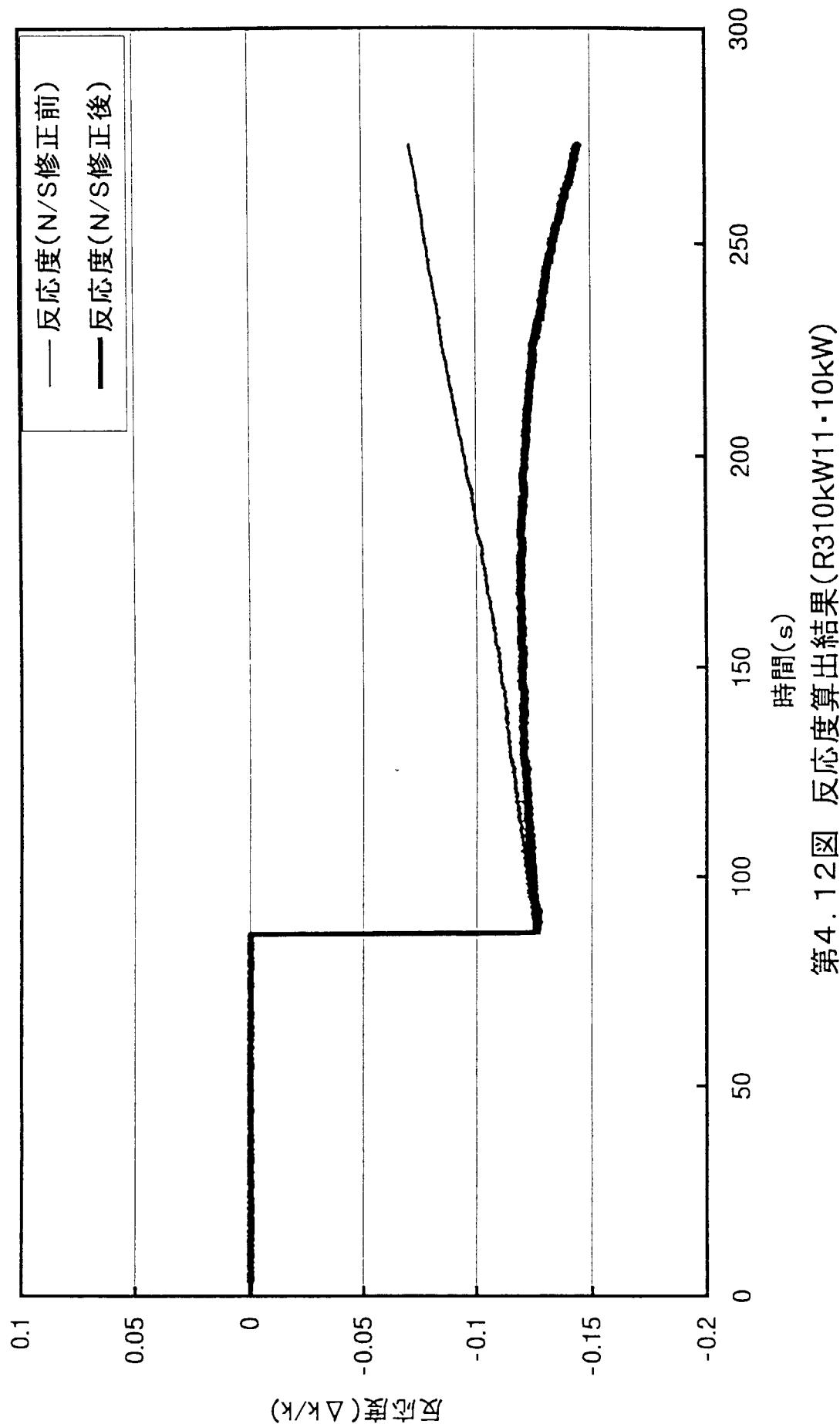


第4.9図 中性子信号計測結果(R320W-01・20W)

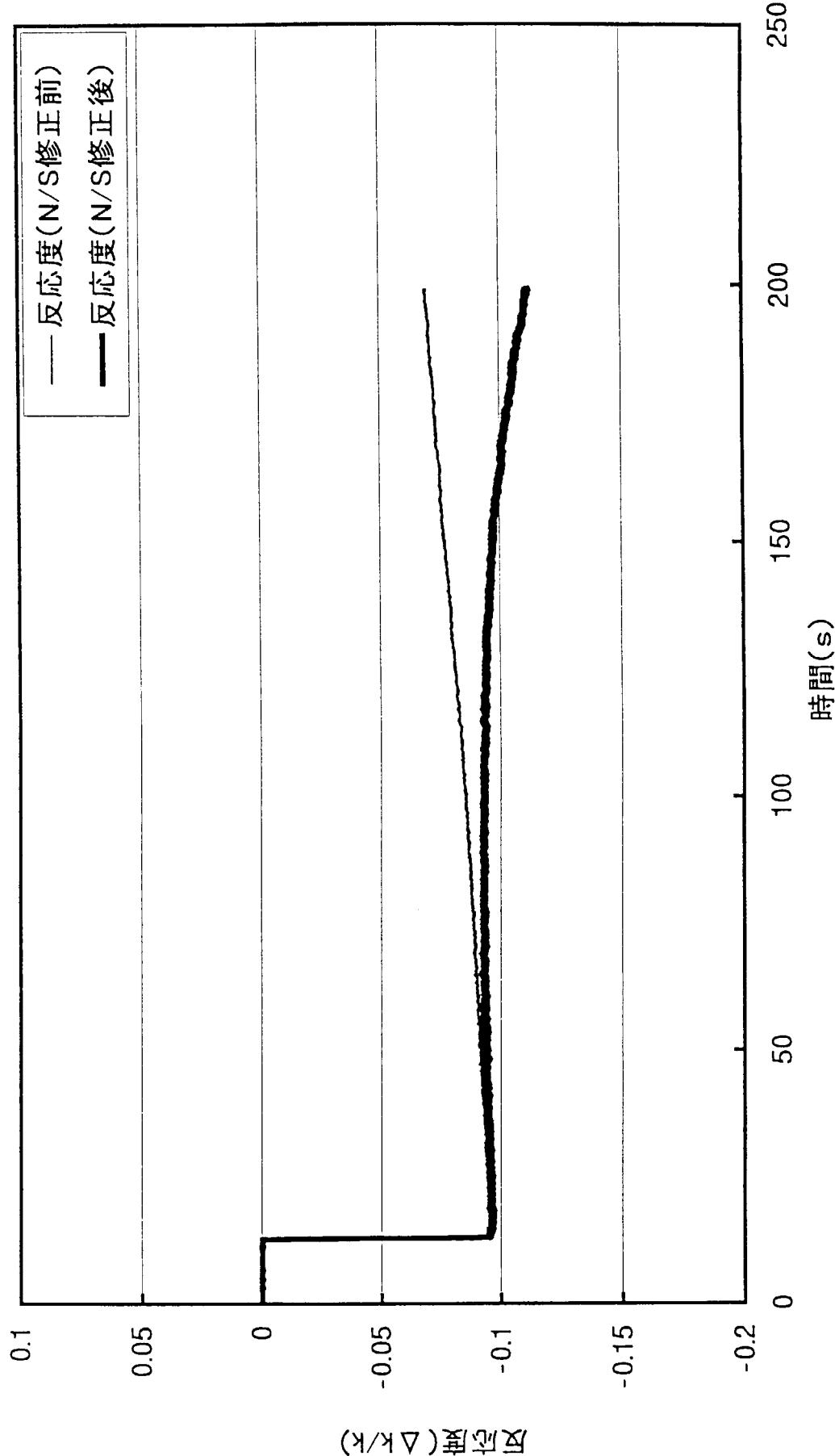


第4.10図 反応度算出結果(R3Log-01-10kW)

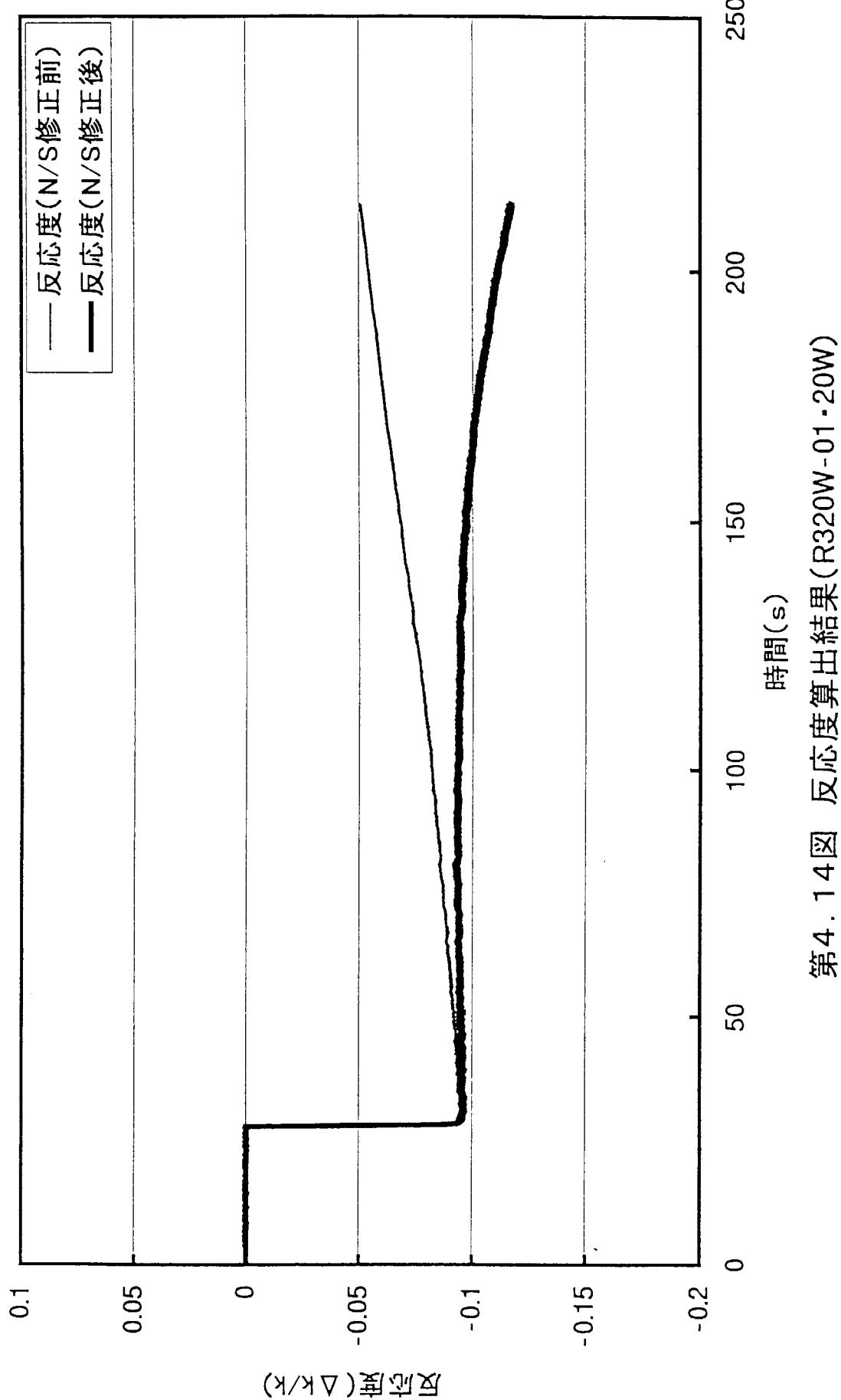


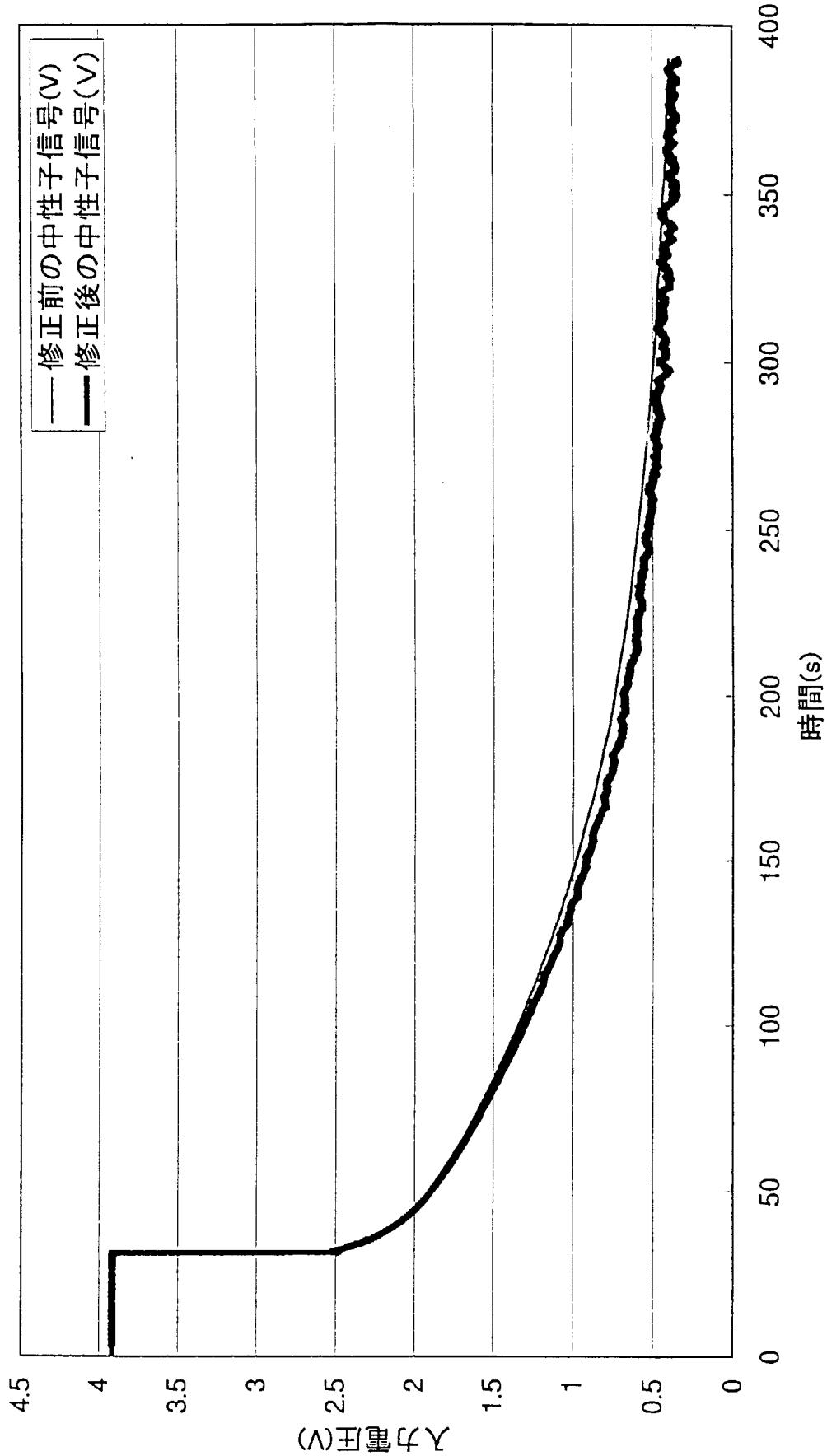


第4.12図 反応度算出結果(R310kW11・10kW)

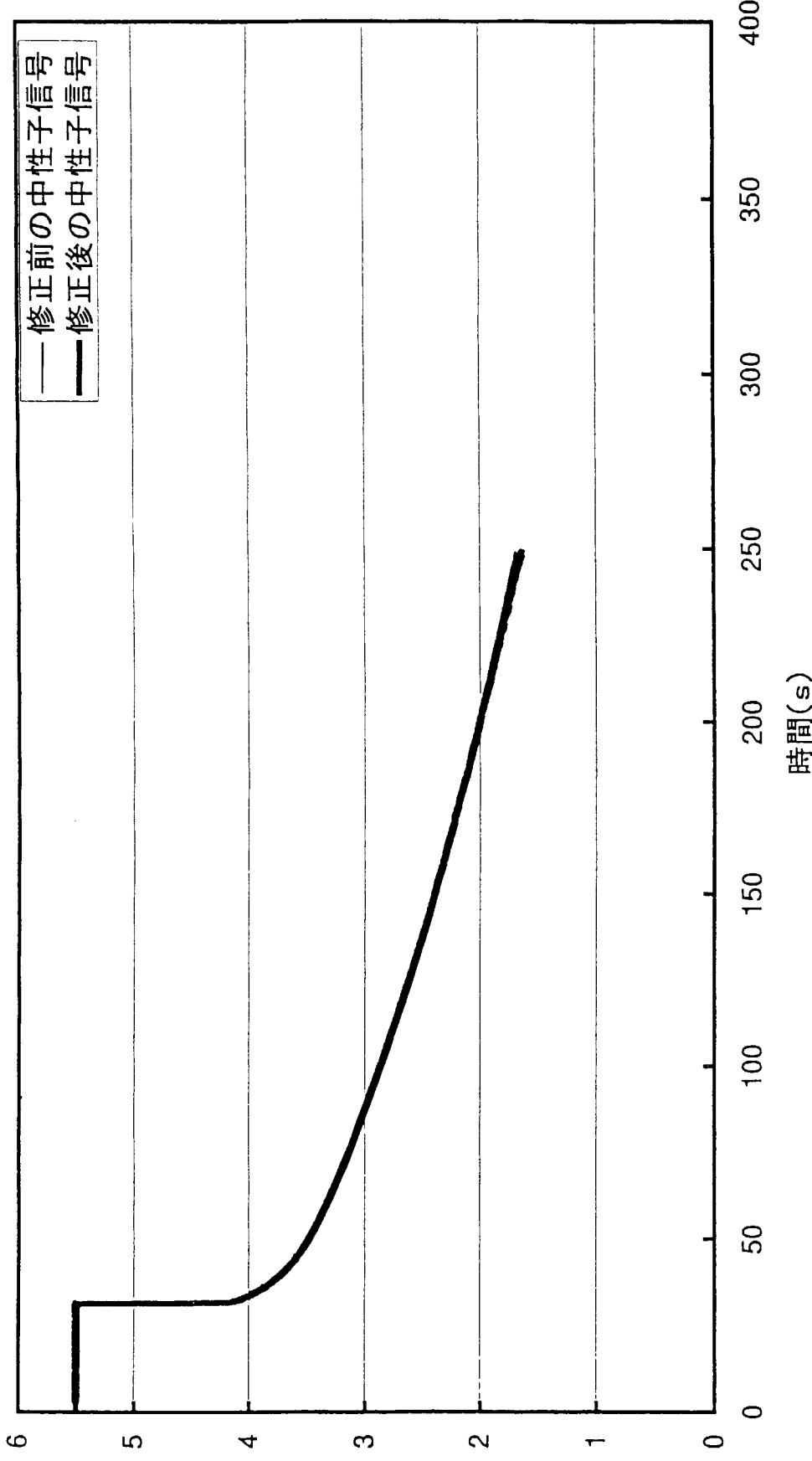


第4.13図 反応度算出結果(R3100W02・100W)



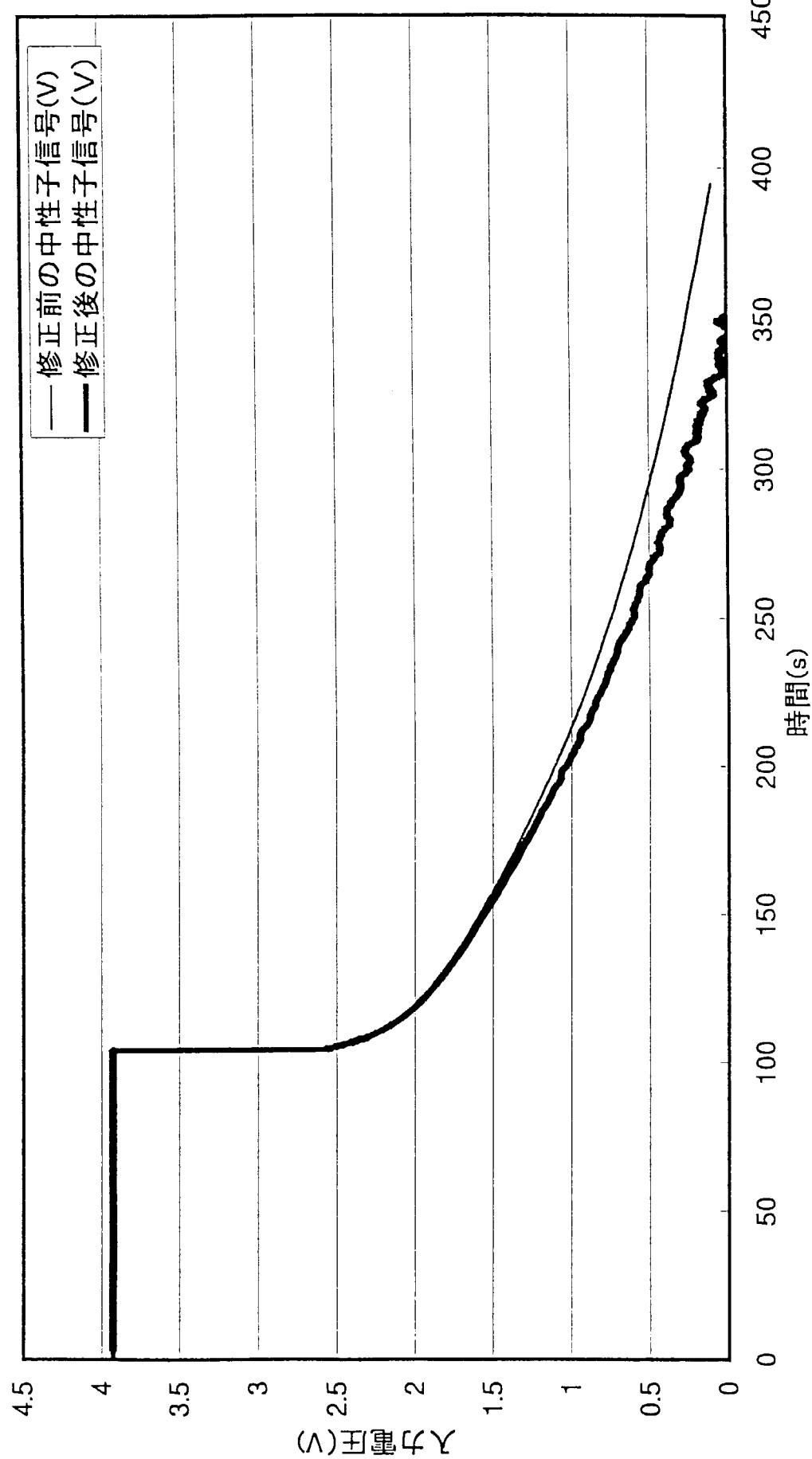


第4.15図 対数増幅器の遅れ応答を補正した前後の中性子信号
(R3Log-01・10kW)

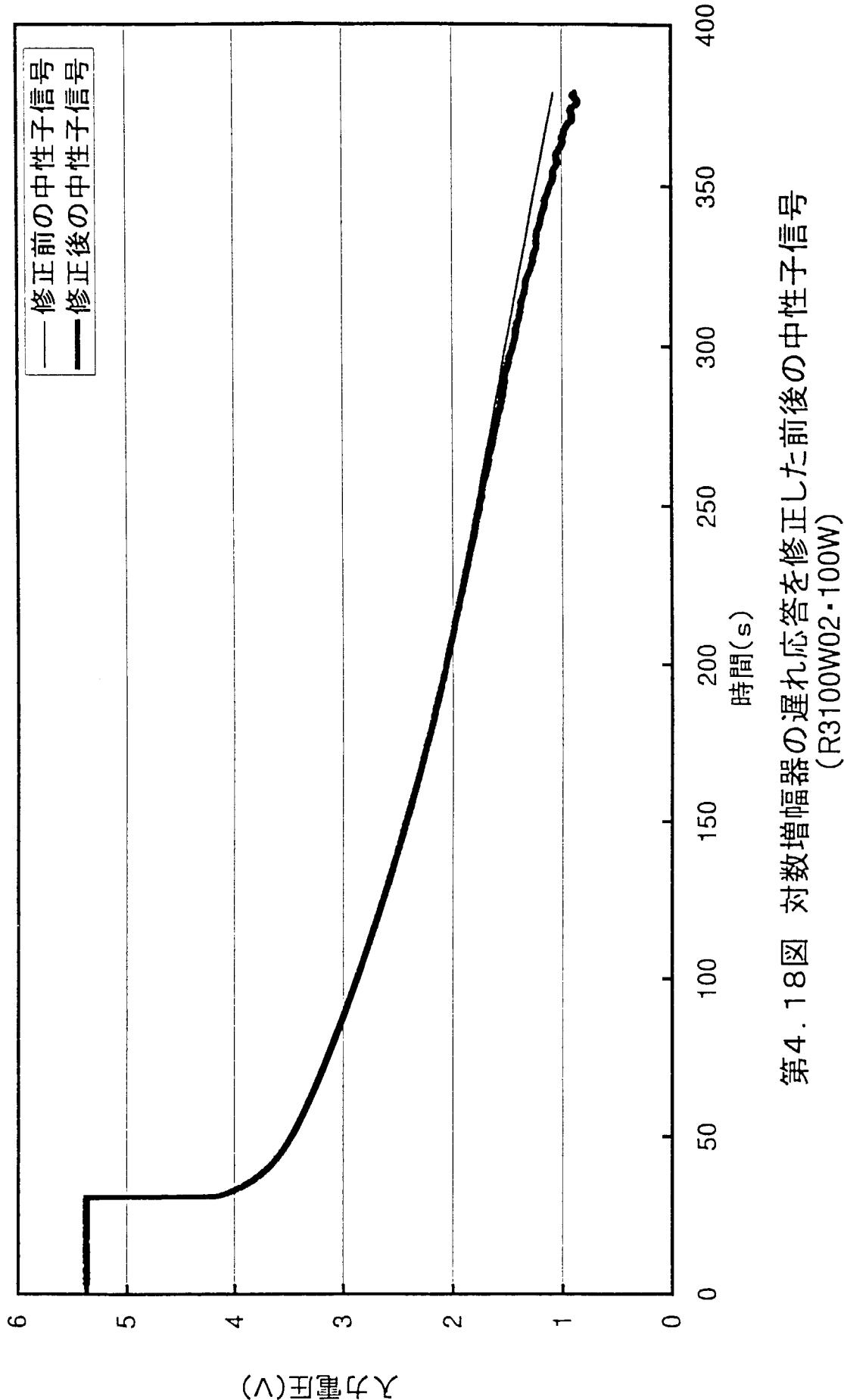


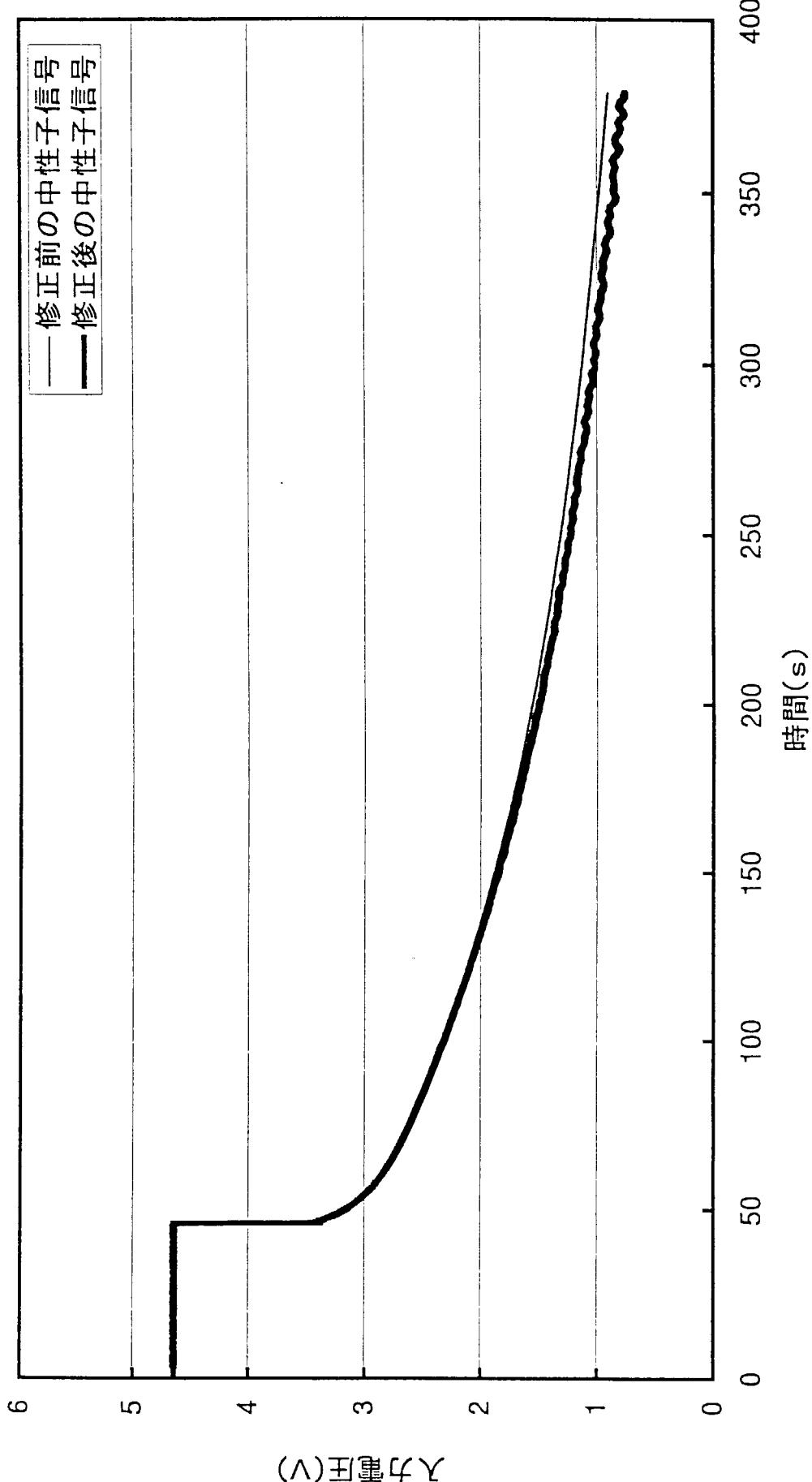
第4.16図 対数増幅器の遅れ応答を修正した前後の中性子信号
(R3_10W03)

(V)電圧入力

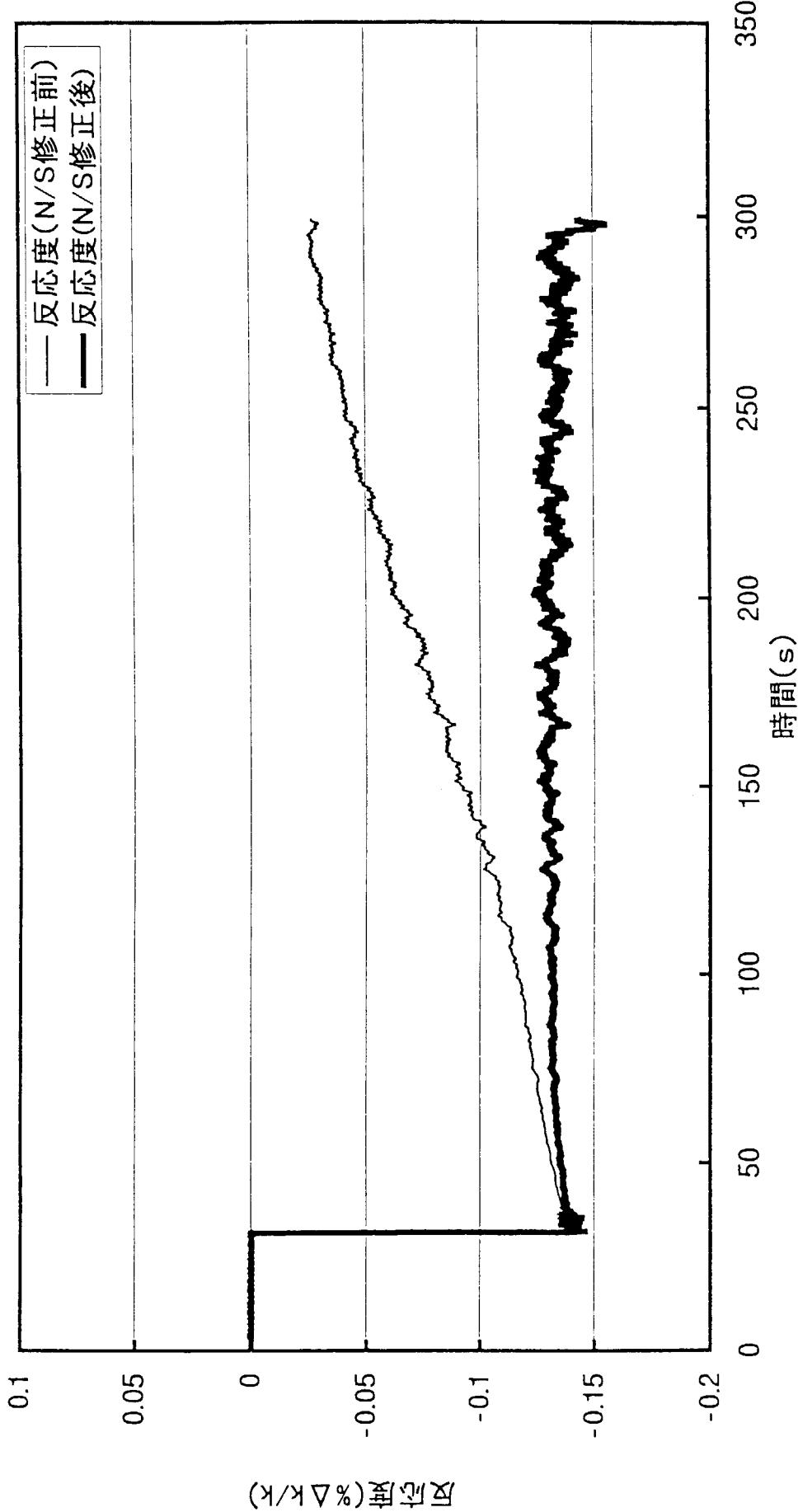


第4.17図 対数増幅器の遅れ応答を修正した前後の中性子信号
(R310kW1・10kW)

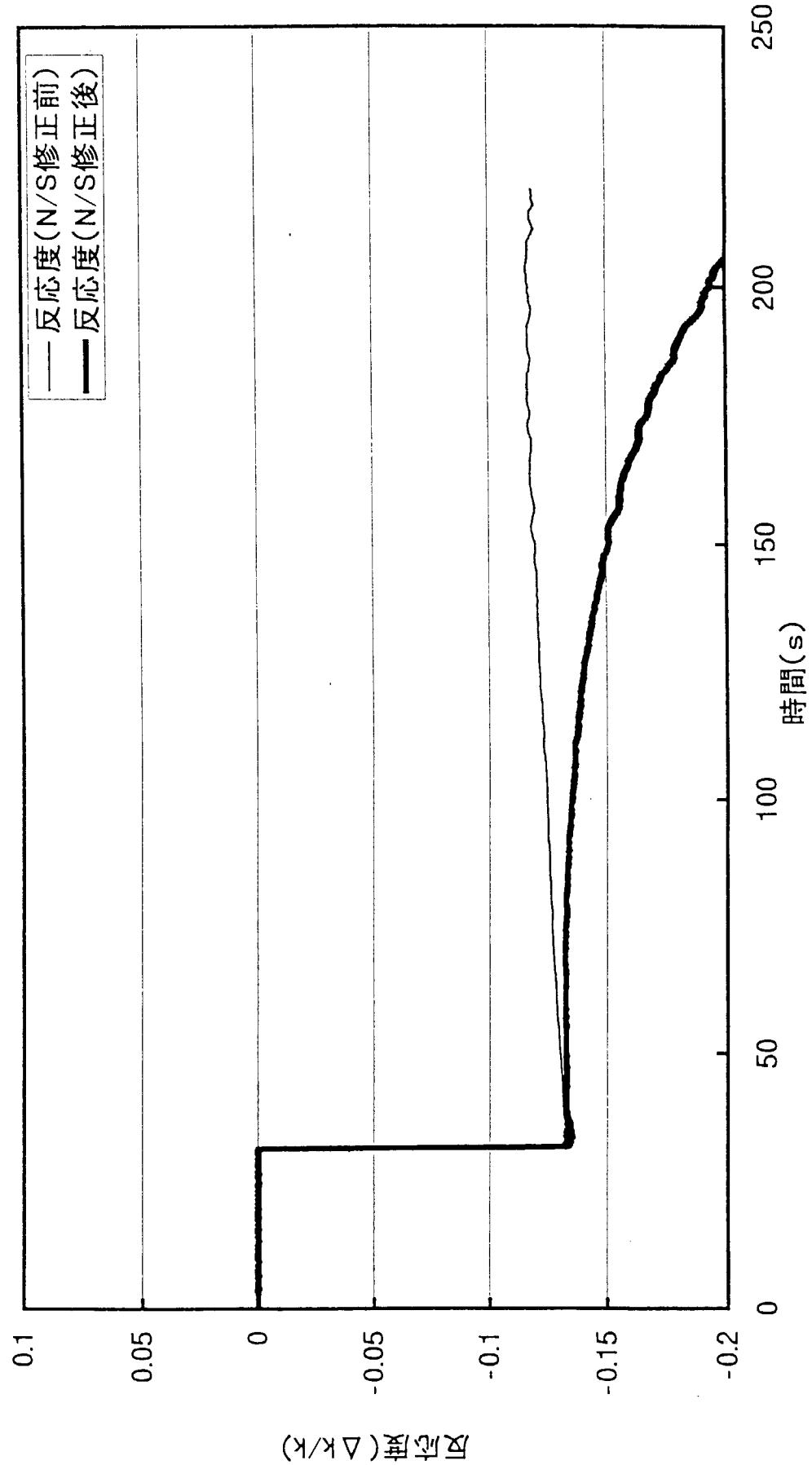




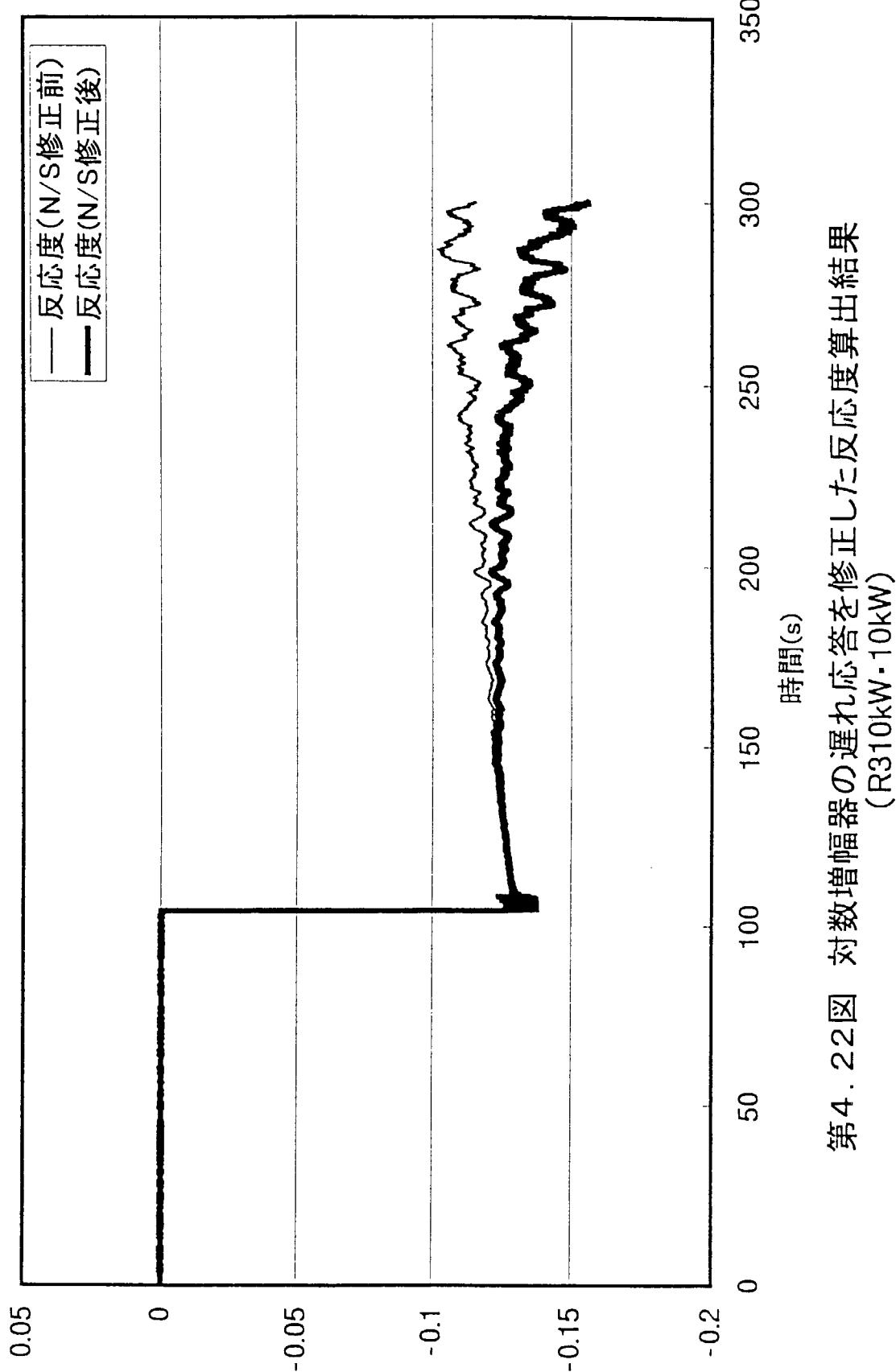
第4.19図 対数増幅器の遅れ応答を修正した前後の中性子信号
(R320W-01)



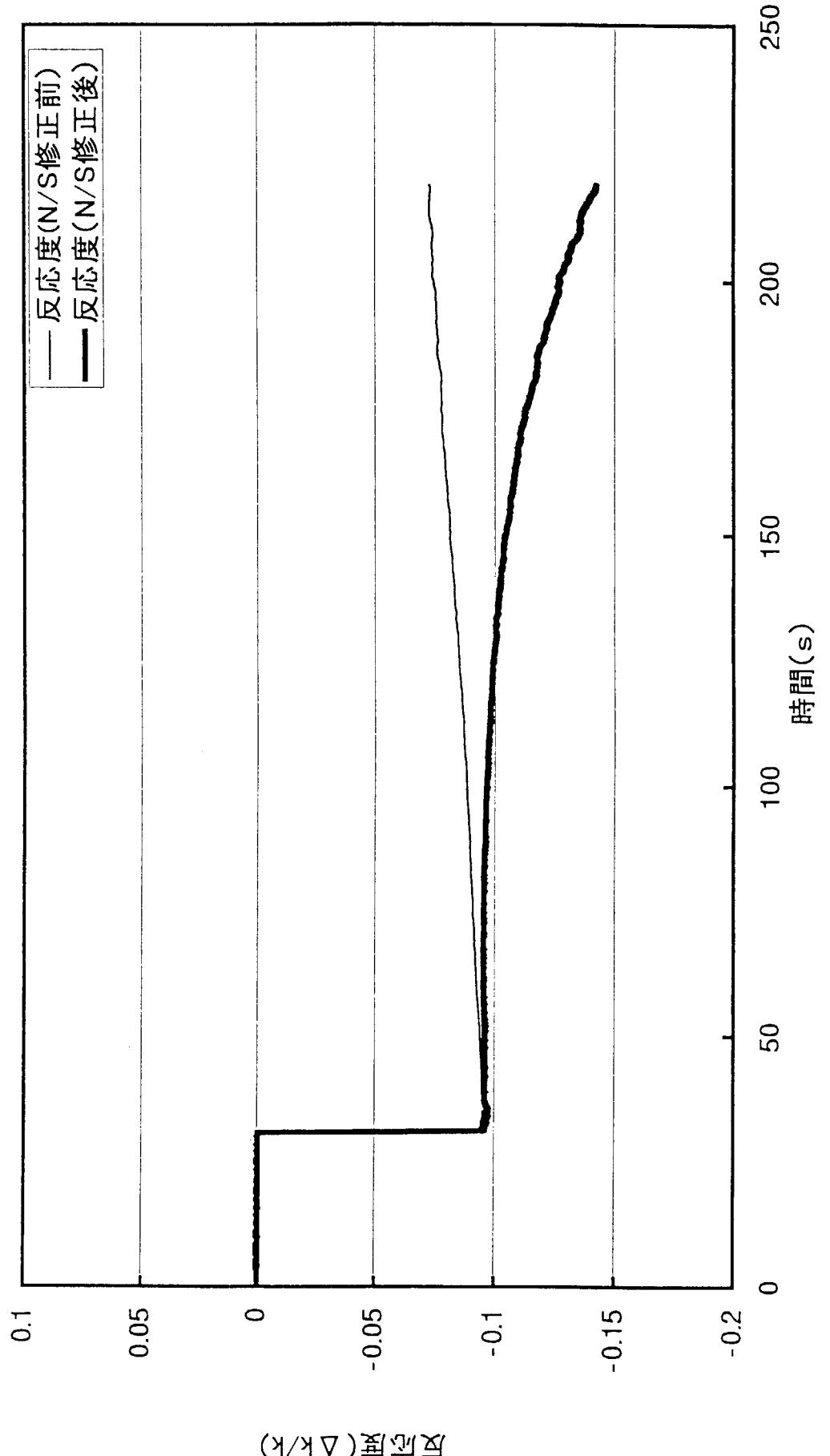
第4. 20図 対数増幅器の遅れ応答を修正した反応度算出結果
(R3Log-01・10kW)



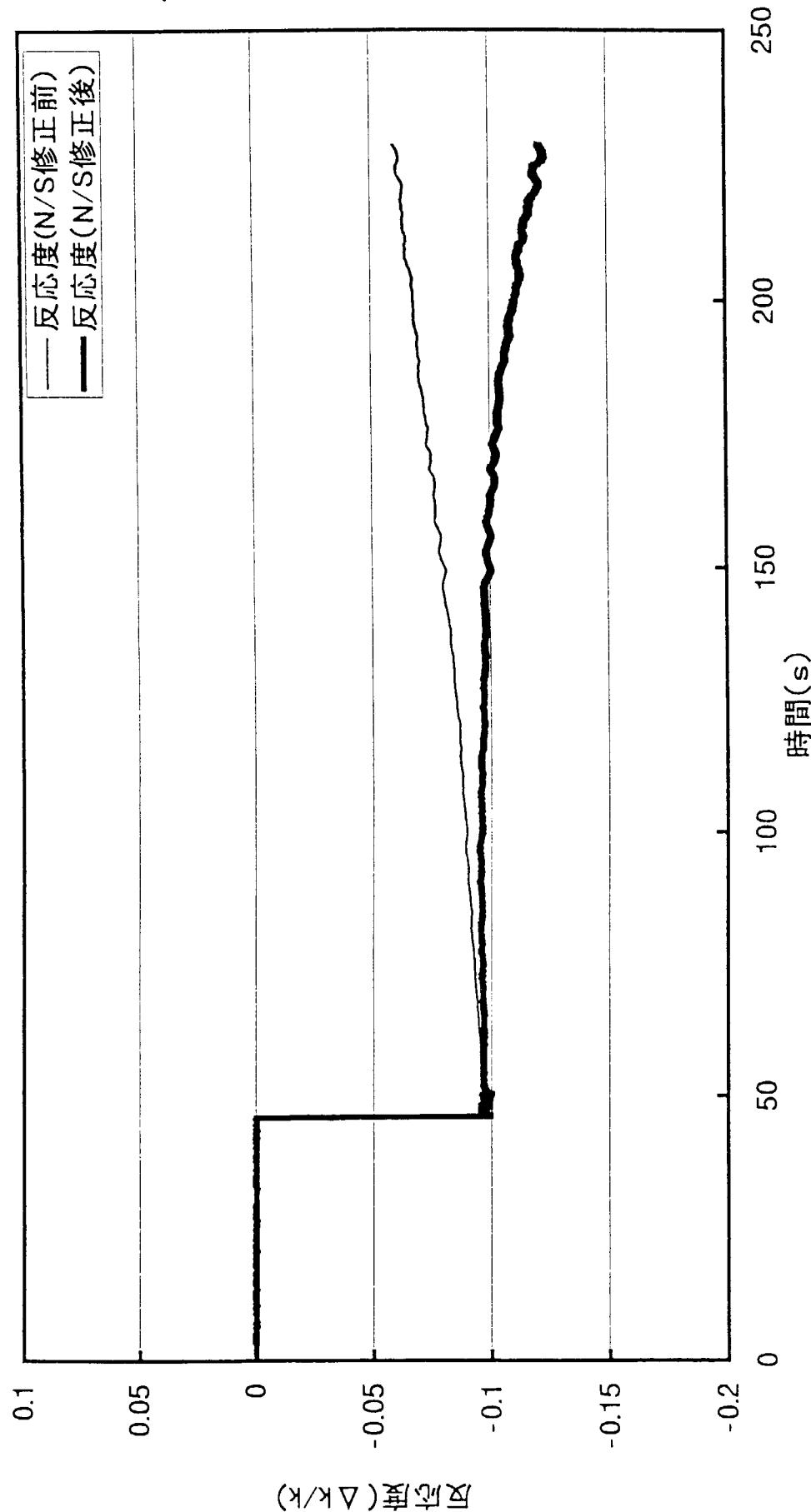
第4.21図 対数増幅器の遅れ応答を修正した反応度算出結果
(R3_10W03 · 10W)



第4. 22図 対数増幅器の遅れ応答を修正した反応度算出結果
(R310kW · 10kW)



第4.23図 対数増幅器の連れ応答を修正した反応度算出結果
(R3100W02-100W)



第4.24図 対数増幅器の遅れ応答を修正した反応度算出結果
(R320W_01)

5. 解 析

5. 1 解析コード

解析コードは、連続エネルギー法に基づく汎用中性子・光子輸送計算モンテカルロコード MVP/GMVP を用いた。核データライブラリは、JENDL-3.2⁽¹²⁾に基づくものを使用した。解析では、ヒストリー数（発生中性子数）2,300,000 とした。

5. 2 解析モデル

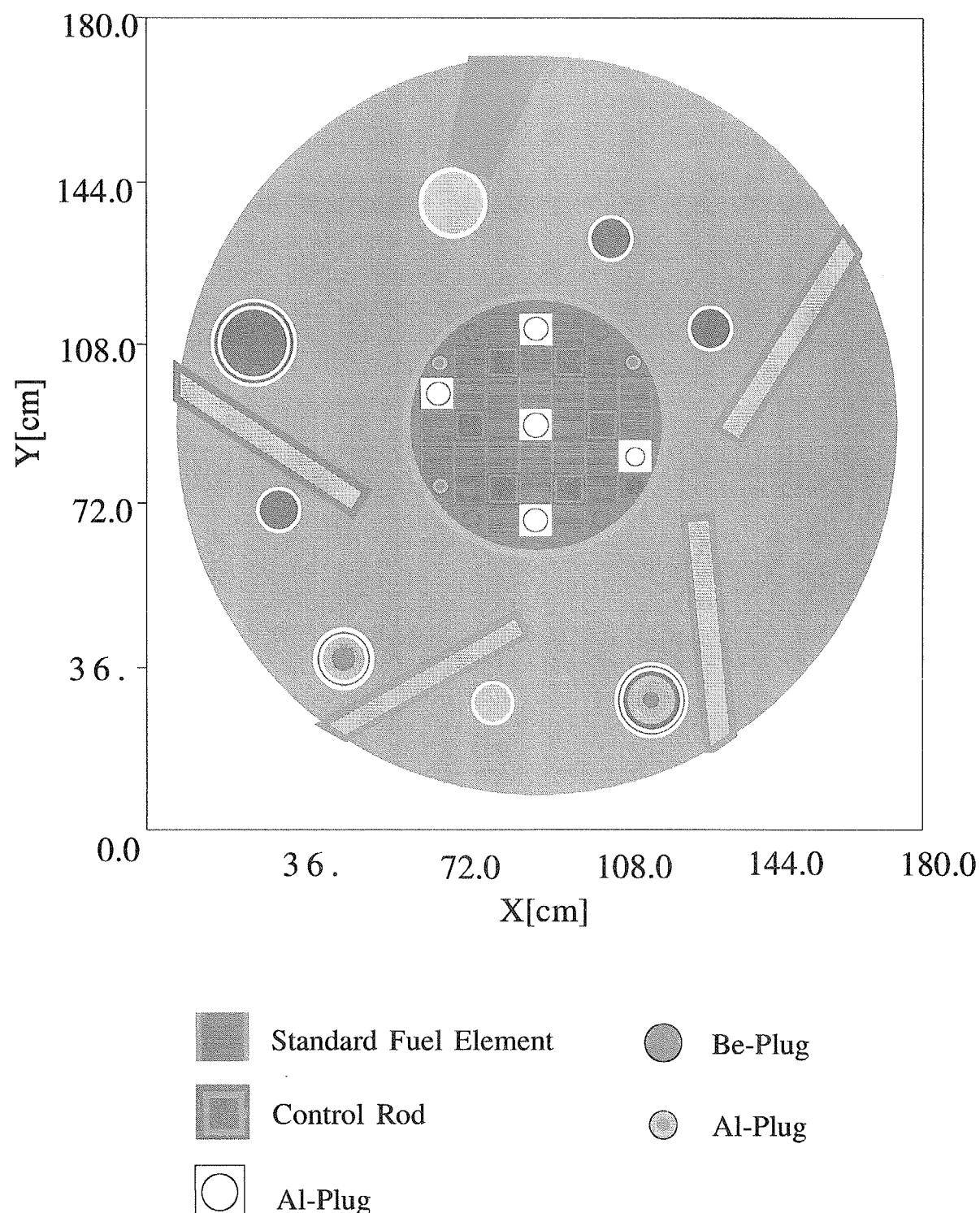
解析モデルは、非均質性が大きい炉心構造であることから詳細な隙間及び形状寸法を用いて、重水反射体重水レベル、制御棒（中性子吸收体及びフォロワ燃料）、板状燃料、可燃性吸收体、ベリリウム反射対、垂直照射孔プラグ、制御棒操作位置についてモデル化した。解析モデルについて水平断面図及び垂直断面図を各々第 5.1 図、第 5.2 図に示す。

計算の方法は、全制御棒を全挿入の状態で、実効増倍率を求め反応度 ($\rho = (k_1 - k_2) / k_1 \cdot k_2$) の換算を行った。

5. 3 解析結果

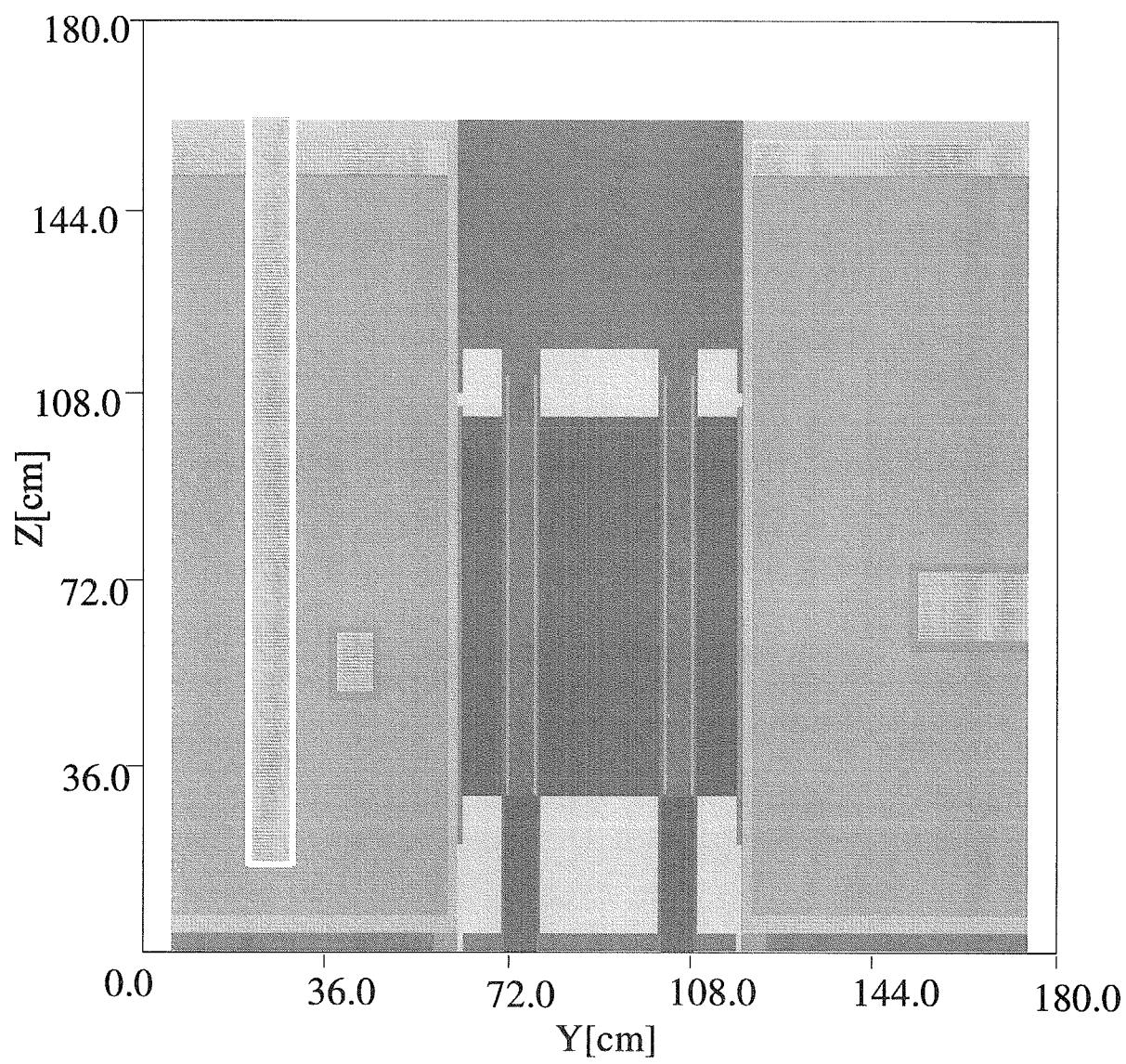
解析モデルを、全制御棒を全挿入の状態で計算を行った結果、実効増倍率は $k_{\text{eff}} = 0.875799$ となつた。その結果、反応度は、 $-14.181\% \Delta k/k$ である。

This is a blank page.



第5.1図 水平断面図

This is a blank page.



第5.2図 垂直断面図

This is a blank page.

6. 評 價

測定手法の妥当性は、第4章の測定結果と第5章の解析結果を比較し確認する。

中性子源強度を考慮した炉停止余裕算出結果と中性子源強度及び対数增幅器の遅れを考慮した炉停止余裕算出結果と MVP コードによる解析結果の比較を第6.1表に示す。

中性子源強度及び対数增幅器の遅れを考慮した結果は、中性子源強度のみを考慮した結果に比べて、MVP コードによる解析結果 $-14.181\% \Delta k/k$ を真とした場合 (JRR-3M シリサイド燃料初装荷炉心の特性試験⁽¹⁰⁾時の解析で MVP コードは良い結果を得ている)、測定結果 R3Log-01 で 1.9%、R3-10W03 で 1.9%、R310KW11 で 3.3%、R3100W02 で 2.1%、R320W-01 で 2.0% の測定精度が向上した結果を得た。このことから、対数增幅器の遅れ補正の有効性が確認できた。

しかし、MVP コードによる解析結果に比し、約 68%～約 94% と減少した結果となった。これは、検出器の設置位置が関係していると考えられる。第4.4図の中性子検出器配置図を見ると検出器はどの測定でも制御棒位置より上方に配置されている。また、第6.1図の軸方向の中性子束分布 (JRR-3M シリサイド燃料初装荷炉心の特性試験時の中性子束分布測定結果) に示すように、検出器位置は中性子束分布のピークから離れた位置となっていることがわかる。このことから、検出器の設置位置に依存して炉心内の平均的中性子数の時間変化に比例した計測ができなかつたために解析結果との差が生じた結果となったと考えられる。

これらのことから、新たに開発した中性子源強度及び対数增幅器の遅れを考慮する IKRD 法の測定手法は、大きな負の反応度測定の精度向上を図ることができる手法であることを確認できた。

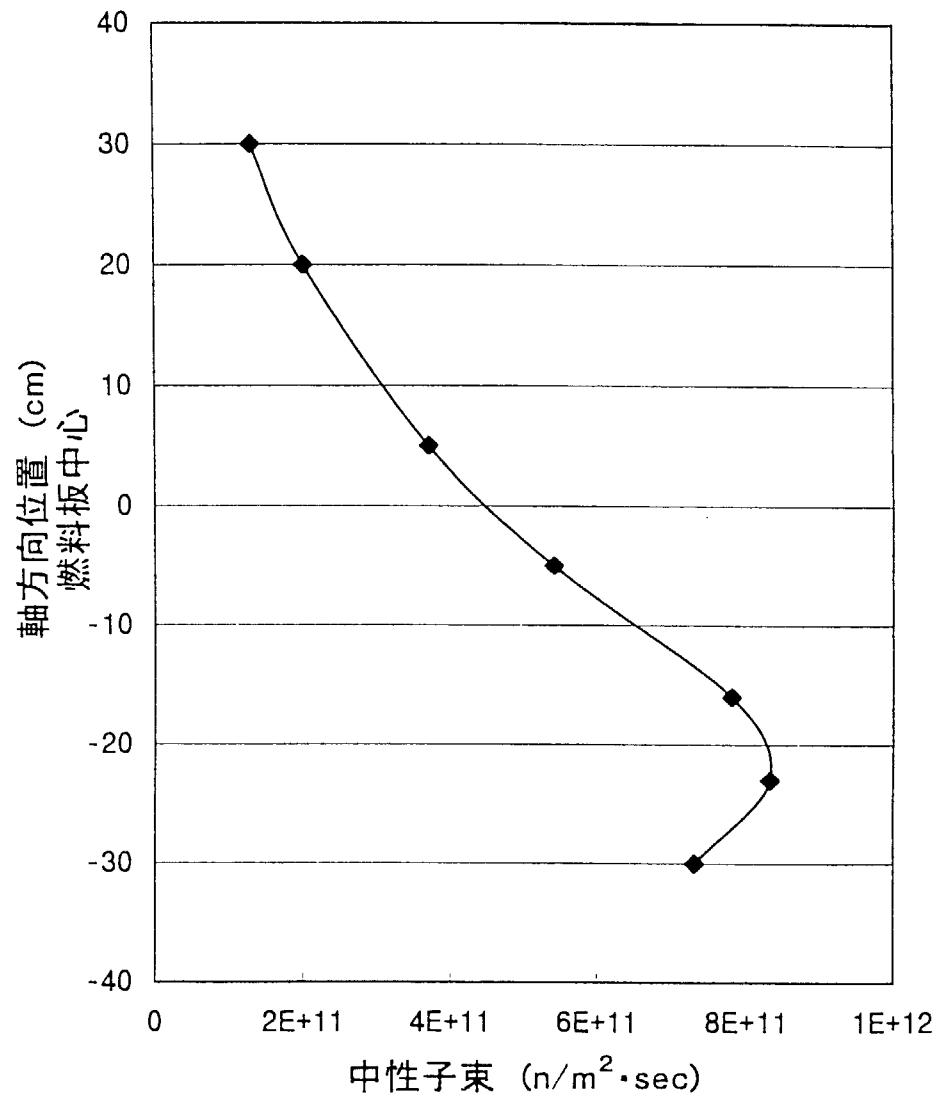
7. 結 言

新たに開発した、大きな負の反応度の測定手法は、中性子源強度及び対数增幅器の遅れ応答特性を考慮した IKRD 法により反応度測定を行うものである。この測定手法を JRR-3M シリサイド燃料初装荷炉心の特性試験時の測定に用いた結果、測定精度の向上を図ることができる手法であることを明らかにした。

今後、検出器位置の影響を修正する測定手法について検討する。

第6. 1表 炉停止余裕算出結果の比較

試験名称 (試験年-月-日)	中性子源強度を考慮した 炉停止余裕 (%Δk/k)	中性子源強度及び対数増幅 器の遅れを考慮した 炉停止余裕 (%Δk/k)
R3Log-01 (99-11-16)	-12.960	-13.215
R3-10W 03 (99-11-05)	-13.016	-13.269
R310kW 11 (00-6-26)	-12.100	-12.509
R3100W 02 (99-9-29)	-9.376	-9.580
R320W -01 (99-9-28)	-9.418	-9.612
MWPコードによる解析結果 (初期炉心)		-14.181



第6.1図 軸方向の中性子束分布
(C4位置の燃料要素)

謝辞

本報をまとめるにあたり、高柳政二研究炉部長、小林晋昇研究炉部次長、桜井文雄 JRR-3 管理課長に技術的なご指導、ご鞭撻を頂いた。

また、測定プログラムの作成、事前解析について日立エンジニアリングサービス株式会社八塚尚氏にご協力と助言を頂きました。深く感謝の意を表します。

参考文献

- (1) Yasuo OHSAWA and Kanji KATO : J.Nucl.Sci.and Technol.,8[3],122~128 (1971)
- (2) 金子義彦他：日本原子力学会誌、Vo.19、No 6、380～390 (1977)
- (3) グレン F.ノル、訳者木村逸郎、阪井英次：“放射線計測ハンドブック(第2版)”、日刊工業新聞社 (1991)
- (4) 森貴正、中川正幸：JAERI-DATA/Code 94-007、“MVP/GMVP 連続エネルギー法及び多群法に基づく汎用中性子・光子輸送計算モンテカルロコード” (1994)
- (5) 竹内光男、和田茂、高橋広幸、林和彦、村山洋二：JAERI-Tech2000-054、“定常的な中性子源の影響を受ける場合の逆動特性法による制御棒反応度価値測定手法の開発” (2000)
- (6) 鈴木武、山田作太郎：“数理統計学”、内田老鶴園 (1996)
- (7) サイモン ヘイキン、訳者武部幹：“適応フィルタ入門”、現代工学社 (1987)
- (8) 中村尚五：“ビギナーズデジタルフィルタ”、東京電機大学印刷局 (1989)
- (9) 川口千代二、荒克之：“原子炉の計測”、幸書房 (1978)
- (10) 日本原子力研究所 JRR-3 管理課・研究炉利用課：JAERI-Tech 2000-027、“JRR-3M シリサイド燃料炉心の特性試験” (2000)
- (11) 竹本晃、稻村浩：“A-D 変換器を使いこなす”、CQ 出版株式会社 (1990)
- (12) K.Shibata,et al., : JAERI-1319, “JENDL-3 : Japanese Evaluation Nuclear Data Library, Version 3”, (1990)

国際単位系(SI)と換算表

表1 SI基本単位および補助単位

量	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質量	モル	mol
光强度	カンデラ	cd
平面角	ラジアン	rad
立体角	ステラジアン	sr

表3 固有の名称をもつSI組立単位

量	名称	記号	他のSI単位による表現
周波数	ヘルツ	Hz	s ⁻¹
力	ニュートン	N	m·kg/s ²
圧力、応力	パスカル	Pa	N/m ²
エネルギー、仕事、熱量	ジョール	J	N·m
功率、放射束	ワット	W	J/s
電気量、電荷	クーロン	C	A·s
電位、電圧、起電力	ボルト	V	W/A
静電容量	ファラード	F	C/V
電気抵抗	オーム	Ω	V/A
コンダクタンス	ジーメンス	S	A/V
磁束	ウェーバ	Wb	V·s
磁束密度	テスラ	T	Wb/m ²
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A
セルシウス温度	セルシウス度	°C	
光束度	ルーメン	lm	cd·sr
照度	ルクス	lx	lm/m ²
放射能	ベクレル	Bq	s ⁻¹
吸収線量	グレイ	Gy	J/kg
線量当量	シーベルト	Sv	J/kg

表2 SIと併用される単位

名称	記号
分、時、日	min, h, d
度、分、秒	°, ', "
リットル	l, L
トント	t
電子ボルト	eV
原子質量単位	u

$$1 \text{ eV} = 1.60218 \times 10^{-19} \text{ J}$$

$$1 \text{ u} = 1.66054 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

表5 SI接頭語

倍数	接頭語	記号
10 ¹⁸	エクサ	E
10 ¹⁵	ペタ	P
10 ¹²	テラ	T
10 ⁹	ギガ	G
10 ⁶	メガ	M
10 ³	キロ	k
10 ²	ヘクト	h
10 ¹	デカ	da
10 ⁻¹	デシ	d
10 ⁻²	センチ	c
10 ⁻³	ミリ	m
10 ⁻⁶	マイクロ	μ
10 ⁻⁹	ナノ	n
10 ⁻¹²	ピコ	p
10 ⁻¹⁵	フェムト	f
10 ⁻¹⁸	アト	a

(注)

- 表1～5は「国際単位系」第5版、国際度量衡局1985年刊行による。ただし、1eVおよび1uの値はCODATAの1986年推奨値によった。
- 表4には海里、ノット、アール、ヘクタールも含まれているが日常の単位なのでここでは省略した。
- barは、JISでは流体の圧力を表わす場合に限り表2のカテゴリーに分類されている。
- EC閣僚理事会指令ではbar、barnおよび「血圧の単位」mmHgを表2のカテゴリーに入れている。

換算表

力	N(=10 ⁵ dyn)	kgf	lbf
	1	0.101972	0.224809
9.80665	1	2.20462	
4.44822	0.453592	1	

$$\text{粘度 } 1 \text{ Pa}\cdot\text{s} (\text{N}\cdot\text{s}/\text{m}^2) = 10 \text{ P} (\text{ポアズ}) (\text{g}/(\text{cm}\cdot\text{s}))$$

$$\text{動粘度 } 1 \text{ m}^2/\text{s} = 10^4 \text{ St} (\text{ストークス}) (\text{cm}^2/\text{s})$$

圧	MPa(=10 bar)	kgf/cm ²	atm	mmHg(Torr)	lbf/in ² (psi)
力	1	10.1972	9.86923	7.50062 × 10 ³	145.038
0.0980665	0.0980665	1	0.967841	735.559	14.2233
0.101325	0.101325	1.03323	1	760	14.6959
1.33322 × 10 ⁻⁴	1.33322 × 10 ⁻⁴	1.35951 × 10 ⁻³	1.31579 × 10 ⁻³	1	1.93368 × 10 ⁻²
6.89476 × 10 ⁻³	6.89476 × 10 ⁻³	7.03070 × 10 ⁻²	6.80460 × 10 ⁻²	51.7149	1

エネルギー・仕事・熱量	J(=10 ⁷ erg)	kgf·m		kW·h		cal(計量法)	Btu	ft · lbf	eV	l cal = 4.18605 J(計量法)	
		1	0.101972	2.77778 × 10 ⁻⁷	0.238889					= 4.184 J (熱化学)	
9.80665	1	2.72407 × 10 ⁻⁶	2.34270	9.29487 × 10 ⁻³	7.23301	6.12082 × 10 ¹⁹				= 4.1855 J (15 °C)	
3.6 × 10 ⁶	3.67098 × 10 ⁵	1	8.59999 × 10 ⁵	3412.13	2.65522 × 10 ⁶	2.24694 × 10 ²⁵				- 4.1868 J(国際蒸気表)	
4.18605	0.426858	1.16279 × 10 ⁻⁶	1	3.96759 × 10 ⁻³	3.08747	2.61272 × 10 ¹⁹				仕事率 1 PS(仮馬力)	
1055.06	107.586	2.93072 × 10 ⁻⁴	252.042	1	778.172	6.58515 × 10 ²¹				= 75 kgf·m/s	
1.35582	0.138255	3.76616 × 10 ⁻⁷	0.323890	1.28506 × 10 ⁻³	1	8.46233 × 10 ¹⁸				= 735.499 W	
1.60218 × 10 ¹⁸	1.63377 × 10 ²⁰	4.45050 × 10 ⁻²⁶	3.82743 × 10 ⁻²⁰	1.51857 × 10 ⁻¹²	1.18171 × 10 ⁻¹⁹	1					

放射能	Bq	Ci	吸収線量	Gy	rad	照射線量	C/kg	R	線量当量	Sv	rem
	1	2.70270 × 10 ⁻¹¹		1	100		1	3876		1	100
3.7 × 10 ¹⁰	1		0.01	1		2.58 × 10 ⁻⁴	1		0.01	1	

逆動特性法を用いた大きな負の反応度測定法の開発